

# BYRTE KRAFTVERK

BRUDD I RÅSPRENGT TRYKKSJAKT

RAPPORT



NORGES VASSDRAGS- OG ELEKTRISITETSVESEN  
STATSKRAFTVERKENE

BYRTE KRAFTVERK  
BRUDD I UFORET TRYKKSJAKT

Rapport

---

Januar 1970

Den 29. september 1968 fikk man brudd i en uforet trykksjakt ved Byrte kraftverk i Telemark.

Bruddet førte til store ødeleggelser i kraftstasjonen, idet maskinsalen med praktisk talt alt kraftstasjonsutstyret ble satt under vann. Reparasjonsarbeidene ble både kostbare og til dels kompliserte og førte til at kraftverket først kom i drift 9. september 1969.

Nærværende rapport tar sikte på å redegjøre for det faktiske hendelsesforløp, reparasjonsarbeidene i trykksjakten samt å forklare årsakssammenhengen så langt man mener å kjenne den. Enkelte spørsmål vil naturlig nok i en sak som denne fortsatt stå ubesvart, men i hovedtrekkene er de primære årsakene til bruddet klarlagt.

Mer enn 25 uforede trykksjakter med statisk trykk mellom 100 og 450 m er i drift i Norge i dag og vi må vente at det vil bli bygget flere i årene som kommer.

Det ligger i sakens natur at et rikt erfaringsmateriale alltid vil ha stor betydning for prosjekteringen av uforede trykksjakter. Derfor har et uhell og det som har sammenheng med dette faglig interesse. Her håper vi at rapporten skal yte et bidrag og derved ha en misjon.

Grunnen til at rapporten sendes ut først nå er først og fremst at vi fant det riktig å vente til alle reparasjonsarbeider var fullført og kraftverket satt i drift. Dessuten ville vi vente på et nytt og mer detaljert kart enn det vi hadde over dalsiden. Det kunne bli aktuelt med ytterligere undersøkelser i form av seismikk, diamantboringer med vanngjennomgangsforsøk og optiske undersøkelser av borhullene samt bergtrykksmålinger i kraftstasjonen.

Kartet i 1 : 1000 ble tatt opp i sommer. Det brakte lite nytt inn i bildet, og da man på det tidspunkt mente å ha klarhet i årsaken til bruddet, ble ytterligere undersøkelser sløffet.

Rapporten er utarbeidet i samarbeid med professor Selmer-Olsen og lic. techn. Reidar Lien. Sistnevnte ble konsultert vedrørende tetnings- og sikringsarbeidene i sjakten etter at den var drevet gjennom og har fulgt arbeidene etterpå. Registreringen i sjakten etter bruddet ble utført av lic. techn. Jan Berg-Christensen. Professor Selmer-Olsen ble konsultert etter at bruddet var inntruffet i samband med de ingeni-

ørgelogeiske vurderinger som er gjort for å klarlegge årsakssammenhengen og de reparasjonsarbeider som ble nødvendige. Avsnittet "Årsaken til bruddet" er utarbeidet av professor Selmer-Olsen.

### Beskrivelse.

Byrte er det minste av kraftverkene i Tokke-komplekset, fig. 1. Det utnytter en bruttofallhøyde på ca. 270 m mellom Botnedalsvatn og Byrtevatn i sidevassdragene til Tokke-åis nedre løp.

Kraftverket har et aggregat på 20 MW nominell effekt ved 9 m<sup>3</sup>/sek. Det har en sentral beliggenhet i forhold til de øvrige stasjoner og blir fullstendig fjernstyrt fra en driftssentral på Dalen.

Utformingen av kraftverket ga seg naturlig ut fra de topografiske forhold, fig. 2. Selve kraftstasjonsområdet ble lokalisert til et område ved søndre ende av Byrtevatn. Den geologiske rapporten utarbeidet av NGU konkluderte med at det beste området for kraftstasjonens plassering var i et forholdsvis massivt fjellparti et par hundre meter ovenfor utløpsoset. Man antok at det ikke ville by på problemer av stabilitetsmessig art for drivingen av tilløpstunnelen.

Forsåvidt slo dette til. Hverken i tilløpstunnelen eller i stasjonsområdet hadde man noen vanskeligheter med stabiliteten under drivingen.

Bergarten i området består av gneisgranitt av grunnfjellalder og tilhører Telemarksformasjonen i det sydnorske grunnfjellsområdet. Bergarten er middelskornig og stort sett homogen, men har enkelte steder typisk gneisstruktur. For det meste kan fjellet karakteriseres som massivt, men det er flere steder gjennomsett av markerte enkeltflepper og fleppesoner hvor fjellet må karakteriseres som fleppete.

Det tektoniske bilde i området er sterkt preget av en større nord-sydgående forkastningssone langs Byrtevatn. Det finnes fleppesoner tilnærmet parallelt denne forkastningen og med fall ut mot dalbunnen. Disse fleppene gir seg til kjenne ved bratte, plane svaberg oppe i fjellsiden. Videre finnes det fleppesoner som står mer loddrett på dalsiden.

Kraftstasjonen med trykksjakten ligger i et fjellparti mellom to slike soner.

Vi kommer tilbake til de fleppene som hadde betydning for bruddet senere.

### Prosjekteringen av kraftverket.

Tilløpstunnelen er 2.5 km lang med 9 m<sup>2</sup> tverrsnitt. Den er i sin helhet drevet fra tverrslag ved inntaket i Botnedalsvatn. Den viste seg ved inspeksjon å være intakt etter bruddet og skal ikke omtales nærmere.

I forprosjektet bearbeidet man 3 hovedalternativ for kraftstasjon og trykkrør:

1. Kraftstasjon i dagen og frittliggende stålrør.
2. Stålforet trykksjakt med kraftstasjon i fjell.
3. Uforet trykksjakt ned til 200 m statisk trykk og derfra stålrør til stasjon i fjell.

Kostnadmessig viste dette siste alternativ seg å stå best. Det ga også fordeler for driften, idet en fikk flyttet avstengningsorganet ned på et lavere nivå.

Ved den senere detaljbearbeiding av dette alternativ valgte man å gå med uforet sjakt helt ned til turbinnivå og legge stasjonen i fjell, fig. 3. Den uforede trykksjakten fikk derved et største statisk trykk på 300 m. Helningsvinkelen ble fastlagt til  $60^{\circ}$  og tverrsnittet til  $6.5 \text{ m}^2$  - sirkulært. På det tidspunkt var dette blant de høyeste trykk som inntil da var anvendt her i landet. Senere er det nye Tafjordanlegget satt i drift med 450 m statisk trykk i helt uforet sjakt.

Grunnen til at de uforede trykksjakter har funnet så stor anvendelse er hovedsakelig at de er praktisk talt vedlikeholdsfrie på linje med en vanlig trykktunnel. Falltappet blir mindre enn i en foret sjakt fordi det økonomiske tverrsnitt er forholdsvis så mye større, og de direkte anleggskostnadene blir mindre.

Sammenligner man f. eks. den prosjekterte løsning på Byrte med konvensjonell pansring, ligger kostnaden på henholdsvis 1.4 og 2.2 mill. kroner - det siste beløpet tillagt kapitalisert falltapsforskjell.

Når det gjelder det rent konstruktive ved en uforet trykksjakt må man sørge for at den ytre stabilitet er til stede, med andre ord at fjellmassivet i seg selv er i stand til å motstå vanntrykket i sjakten. Ved Byrte baserte man seg på et overlageringsforhold på 1.5, det vil si at vekten av overliggende fjellssøyle skal overstige vanntrykket med 50 %. Nå kan det diskuteres hvor langt ut til sidene man skal regne at vanntrykket virker. Bortsett fra et område øverst i sjakten har man på Byrte foreskrevet overlageringshøyde inntil 50 m til hver side av sjakten. Legger man profiler lenger ut fra senterlinjen, finner man senkninger i terrenget hvor overlageringen blir for liten teoretisk sett. Dette er imidlertid såvidt langt til siden for sjakten at forholdet ble ansett å være uten betydning.

Man må også ta hensyn til den indre stabilitet i sjakten. Det må sikres at avskaleringen og erosjonen ikke blir sjenerende. Spenningsforløpet i fjellet rundt sjakten kan tilnærmet beregnes ut fra kjennskapet til topografi og fjellets materialkonstanter. Disse kan bestemmes på forskjellig vis, men det fordres en kostbar måleapparat og helst en prøvestoll i det aktuelle område.

For Byrtes vedkommende fant man at utgiftene til måling av fjellkonstanter og -spen-

ninger ikke sto i forhold til nytten, og man gikk ikke nærmere inn på dette da man regnet med at stabilitetsproblemene ville bli små. Det kan i denne forbindelse nevnes at for en prosjektert, upansret trykksjakt ved Refsdal kraftverk i Vik ble et opplegg for målinger av denne art kalkulert til kr. 400.000.-. Selv med et enklere måleprogram enn dette, er det klart at utgiftene til målinger lett kommer i misforhold til forventet innsparing.

Den ugunstige slepperetning som lett kunne observeres på flyfotos og i terrenget var man naturligvis klar over, men man tok dette med ro. Man regnet med at sjakten var plassert på så stort dyp at man var sikret tilstrekkelig stigende permeabilitet ut mot overflaten. Dette regnet man med ytterligere å forbedre - fortrinnsvis ved injisering av sjakten der man fant det nødvendig.

### Utførelsen av anlegget.

Man mente å basere seg på vel overveide planer, da man startet tilriggingsarbeidene ved anlegget høsten 1964. Arbeidene ble satt i gang etter en moderat tempoplan som et ledd i nedtrappingen av den store anleggsperioden ved Tokke-anleggene.

Kraftstasjonen og tilstøtende tunneler ble drevet uten stabilitetsvanskeligheter, og det forekommer knapt en sikringsbolt i hele området, bortsett fra hvelvet i maskinsalen hvor det ble gjennomført en systematisk permanentsikring med bolter, armeringsnett og sprøytebetong. Fjellet var overalt homogent og tett, og man tok dette som en bekreftelse på at antagelsene i forbindelse med trykksjakten var riktige.

Fjellformasjonene i kraftstasjonsområdet har høyder på opptil 1300 m, det vil si ca. 800 m høyere enn kraftstasjonens nivå. Bergslag kunne derfor ventes i kraftstasjonsområdet, men dette forekom bare i beskjedent omfang og var ingen ulempe under sprengningsarbeidene.

Trykksjakten ble drevet nedenfra med Alimak-utstyr vinteren 1966 - 1967. Fra et anleggsteknisk synspunkt gikk drivingen meget bra uten ekstraordinære tiltak av noen art.

Etter at sjakten var drevet ferdig, drøftet man på grunnlag av den geologiske registrering hvilke permanente sikringsarbeider som skulle utføres, fig. 4.

Ingen steder fant man det påkrevet å gå til full utstøping av hensyn til stabiliteten. Enkelte knusningssoner fantes, men de var ikke verre enn at bolting syntes mest hensiktsmessig. Det ble brukt bolter av sveisbart, galvanisert 20 mm kamstål. Boltene var 1.5 m lange, og til innstøping ble det brukt Betokem EXM ferdigblandet mørtel. Hullet ble fylt innenfra og bolten satt inn til slutt. For å sikre sentrerings av bolten ble det sveiset på ører. For å øke effekten av bolten i særlig oppsprukne partier var enkelte bolter påsveiset en endeplate som ble understøpt sam-

men med bolten. Platene var orientert i forskjellige vinkler i forhold til bolten, og man oppnådde ved dette at svært lite av bolt og plate stakk inn i profilet og forårsaket falltap. I alt ble det satt inn over 1500 bolter.

Enkelte tynne leirsoner fantes. I alt 7 prøver av disse ble sendt til laboratorieundersøkelse med henblikk på svelleleire. Undersøkelsene viste at ingen av prøvene inneholdt større mengder svelleleire. Da i tillegg de observerte materialførende slepper var meget tynne, antok man at det ikke var fare for aktiv svelling i sjakten.

En konsentrert vannlekkasje ved pel 87 ble injisert. Selv om sikringsarbeidene i trykksjakten ble mer omfattende enn opprinnelig antatt, kunne sjakten settes under trykk allerede 17. - 18. juni 1968 - 3 måneder før kraftverket skulle i drift.

Det ble fulgt godt med i terrenget utenfor, men det ble ikke observert noen lekkasjer som oppsto i forbindelse med oppfyllingen. Sommeren 1968 var usedvanlig tørr i Telemark, så en eventuell lekkasje ville lett bli oppdaget. En mindre lekkasje gjennom tetningsproppen i rørtunnelen regnet man med å stoppe ved injisering. Bortsett fra denne lekkasje som antagelig skyldtes utett støp, anså man fjellet for å være tett.

Juli og august måned gikk uten at man oppdaget lekkasjer eller andre tegn på utettheter i sjakten. Det skal her bemerkes at på grunn av den tørre sommeren steg vannet i Botnedalsvatn meget langsomt, og så sent som den 27. august manglet det 22 m på fullt magasin, fig. 5. Trykket var således relativt lavt mesteparten av sommeren.

### Bruddet.

I begynnelsen av september endret bildet seg noe. Man la merke til at drenasjepumpene i stasjonen startet oftere enn tidligere. Målinger viste at lekkasjen var ca. 160 l/min. for hele stasjonsområdet - og tendensen var økende. Midt i måneden avtok vanntilstrømningen noe for så å tilta igjen, og den 26. september var vannmengden kommet opp i over 200 l/min., fig. 6.

Selv om man nok fant at vanntilstrømningen til stasjonen var betenkelig høy, uroet ikke økningen oss noe videre. Økningen fant man nokså naturlig. Som tidligere nevnt, hadde sommeren vært meget tørr. I begynnelsen av september satte det inn med rekordartet nedbør, og hele måneden regnet det intenst. Det var nærliggende å tenke seg at den økte lekkasjen i stasjonen hadde sammenheng med dette.

Da virket et annet forhold mer bekymringsfullt. Omkring 8. september ble det observert leirfarge i en bekk syd for stasjonen. Forholdet ga grunn til spekulasjoner, idet leirfargen ikke godt kunne forklares på annen måte enn at det foregikk en utspyling av sleppemateriale et sted. Hvis det her var en akselererende prosess i



gang, måtte man få stoppet i alle fall utvaskingen og helst også vanntapet. Dersom det ble nødvendig å gå løs på lekkasjen innenfra sjakten, kunne det bli vanskelig å finne lekkasjestedet. Dessuten ville det by på problemer av rent anleggsteknisk art å gå løs på nye arbeider i sjakten. Man regnet imidlertid med å få bedre oversikt over eventuelle lekkasjemengder og -steder når regnvørsperioden var over. Når ikke anlegget ble stoppet og lekkasjespørsmålet studert nøyerer på dette tidspunkt, må man huske at det på denne tiden rant småbekker overalt i fjellsiden, og de fleste bekker var mer eller mindre farget av flomvann.

Søndag morgen den 29. september økte imidlertid lekkasjen inne i stasjonen sterkt, og vannet begynte etterhvert å bli leirfarget også her. De steder der det tidligere hadde vært vannsig på veggene var det nå regulær vannlekkasje som økte etterhvert.

Det hørtes dumpe drønn inne fra fjellmassivet. Også dette hadde en økende tendens. Den tidligere omtalte bekk hadde vokset sterkt og vannet flommet over fylkesveien langs Byrtevatn.

Ved 12-tiden fikk man signal om at lensepumpene ikke holdt unna. Klokka 12.30 var vannet i T-tunnelen steget til ca. 15 m fra A-tunnelen og vannet i kraftstasjonen sto i høyde med turbingulvet. På dette tidspunkt ble luken i inntaket i Botnedalen stengt. Anlegget hadde ikke stengeorgan på toppen av trykksjakten.

På grunn av den store vannmengde i tilløpstunnelen fortsatte derfor vannet å stige i maskinhallen og tilstøtende tunneler utover ettermiddagen. Enkelte steder falt det blokker fra hengen og man kunne fortsatt høre dumpe drønn fra fjellet.

Ved 16-tiden begynte vannføringen fra bruddstedene ute i dagen å avta, men vannet fortsatte å stige i kraftstasjonen med ca. 2 cm/min. og det var intet som kunne forhindre dette.

Ved 21-tiden om kvelden var vannstanden i kraftstasjonen på det høyeste - ca. 2.5 m over maskinsalens gulv.

Forberedelser til lensearbeidet ble satt i gang umiddelbart. Men det tok en del tid innen pumpingen kom i gang. Det måtte rigges til provisorisk strømforsyning til stasjonen. Dessuten hadde undervannsluken forskjøvet seg så meget at vannet i stasjonen en tid kommuniserte med Byrtevatn. Man klarte ikke å få stasjonen tømt helt før tirsdag kveld.

Det sto folk klare til å ta hånd om utstyret i stasjonen straks det ble tilgjengelig, men skadene ble naturlig nok store. Transformatoren klarte seg ganske bra. Generatoren måtte delvis vikles om. For apparatanlegget var det nærmest tale om to-talskade.

De nærmeste dagene gikk med til å drøfte hvordan sakene nå skulle gripes an. Og for



det første måtte man danne seg et bilde av skadenes omfang og såvidt mulig hva årsaken til bruddet kunne være. Befaringer i terrenget avslørte en rekke steder hvor vannet hadde brutt ut i dagen, fig. 7.

Lekkasjene i overflaten følger to forskjellige slepperetninger. Den største lekkasjen oppsto 200 - 250 m syd for trykksjakten og følger en helt plan sleppe med strøk  $N30^{\circ}V$  og  $70^{\circ}$  fall mot NØ. Retningen på denne sleppen peker mot rørtunnelen bak kraftstasjonen. Vannmengden her må minst ha vært av størrelsen  $1 \text{ m}^3/\text{sek.}$  fordelt på en ca. 100 m lang strekning. På et enkelt sted var det tydelig tegn på brudd i massivt fjell.

Den andre lekkasjen, som ligger 250 - 350 m nord for trykksjakten, var vesentlig mindre og er konsentrert over to lokaliteter. Begge steder ligger langs en sleppe med strøk ca. NS og steilt østlig fall. På det ene sted ser det ut til å ha foregått deformasjoner i fjellet.

En må i denne forbindelse peke på de store avstander fra sjakten disse lekkasjestedene ligger. Det innebærer at et fjellparti på ca. 600 m langs fjellsiden er involvert i bruddet i trykksjakten.

Inne i kraftstasjonen finner man sikre spor etter deformasjoner flere steder, fig. 8. I lukekammeret for avløpstunnelen har en muret vegg en sprekk på ca. 5 mm. Denne sprekken følger det ytterste sleppeplan vist på figuren. En tilsvarende sprekk finnes i betongdekket der samme sleppen krysser atkomsttunnelen. Spor etter deformasjoner finnes også langs innerste sleppen i atkomststollen til rørtunnelen og i en nisje helt inne ved proppen. Dette siste stedet har trolig direkte sammenheng med bruddsonen som senere ble lokalisert i sjakten ved pel ca. 100.

Etter at trykksjakten var gjort tilgjengelig for inspeksjon, fant man en praktisk talt sammenhengende bruddsone fra fordelingsbassenget og ned til ca. 100 m fra bunn av sjakten. Her forsvinner den opp i hengen på sjakten og har en retning som peker mot bruddsonen ved ytre kant av proppen i rørtunnelen. Bruddsonen er øverst nærmest for en sprekk å regne, mens den har åpninger på 2 - 3 cm ved pel ca. 200 og ca. 1 cm ved pel 100. Stort sett følger bruddsonen enkelte stikk med  $N50^{\circ}V$  og fall  $50^{\circ}$  NØ, men går flere steder gjennom massivt fjell. Dette forklarer også de drønn som høres inne fra fjellet da bruddet skjedde.

### Arsaken til bruddet.

Det synes å være flere faktorer som har vært medvirkende til bruddet i sjakten. Men det er på det rene at to forhold har spilt en avgjørende rolle, nemlig liten fjell-overdekning og meget ugunstige leirslepperetninger og dermed ugunstige spenningsforhold og strekkfastheter for sjakten.

Når det gjelder de topografiske og geometriske betingelser for plassering av en trykktunnel eller trykksjakt, var en på basis av teoretiske betraktninger kommet frem til at det krav må være oppfylt at vanntrykket i tunnelen eller sjakten ikke skal kunne føre til noen deformasjon av utenforliggende fjell. Dette betyr at in-situ spenningen i det utenforliggende fjell skal være større vinkelrett tak og vegger i sjakten enn det indre vanntrykk, slik at ikke stikk og sprekker kan åpne seg og få rikelig vanntilførsel med maksimalt vanntrykk. Sprengningsprosessen vil ellers være innledet og kunne foregå i løpet av et fåtall dager.

Kommer først vannet fra tunnelen eller sjakten i rikelig mengde ut på en sleppe hvor permeabiliteten er avtagende, må en gå ut fra at den videre utvikling er avhengig av de spenninger som står vinkelrett sleppene. Dette vil si at det alltid er de ugunstigste sprekkeretninger og ugunstigst plasserte sprekker som automatisk utvelges for de videre deformasjoner. Da spenningstilstanden i dalsiden er anisotrop og den lokalt endrer seg nær hver større leirslippe avhengig av dennes karakter og orientering, vil bruddforløpet både være avhengig av de forekommende sleppers orientering og de spenninger som står i dalsiden. Disse spenninger er oftest sterkt topografisk betinget og ikke alene en funksjon av overlagringslasten.

Arbeider en seg innover i en jevn dalside i Norge, er det spenningene parallelt dalsiden som erfaringsmessig først blir tilstrekkelig høye for å motstå et eventuelt vanntrykk. Spenningene vinkelrett dalsiden krever vanligvis vesentlig større dyp i fjellet for å nå de ønskede nominelle verdier. Det er derfor sprekker som går gjennom sjakten med fall nær sjaktens fall og med strøk nær parallelt dalsiden som vanligvis blir foretrukket når vannet sprenger seg veg ut mot dagen. Andre mer tverrgående sprekker vil normalt kreve større vanntrykk for å kunne åpne seg. Dette gjelder også de forholdsvis steile sprekker med strøk nær vinkelrett dalsiden.

Danner dalsiden en fremstikkende nese eller rygg ut mot dalen eller er den gjennomskåret av dype, steile kløfter med liten innbyrdes avstand, eller foreligger det typiske avskjærende leirsoner for dannelsen av horisontalspenninger, vil forholdet lett bli det motsatte. Det vil da kunne være de horisontale in-situ spenninger parallelt dalsiden som sist blir ønskelig store når en arbeider seg innover i dalsiden, og et eventuelt brudd vil fortrinnsvis skje etter sprekker som går i det vertikale sjaktplan nær vinkelrett dalsiden.

Forutsetter en at ingen virkelig ugunstige sprekkeretninger finnes, og at en har injisert alle lekkasjesprekker slik at en har større tetthet rundt sjakten enn utover i fjellet, vil bergartens strekkfasthet og sleppenes skjærfasthet komme inn i bildet og redusere bruddfaren. Dette er et bidrag som i større eller mindre grad alltid vil gjøre seg gjeldende, men det er tvilsomt om man kan regne med det ved plassering av sjakter.

Da en oftest har tre sprekkeretninger med bare et fåtall meter mellom hver sprekk og en serie villsprekker i fjellet, vil en gjennomgående bruddflate sannsynligvis i svært mange tilfeller kunne oppstå når fjelloverlagringen er for liten. Bruddflaten vil kunne være meget uregelmessig og trappeformet. Men den vil i grove trekk dannes nær vinkelrett på den for lave in-situ spenning og i en jevn dalside gjerne komme ut i dagen meget langt til siden for sjakten. Så uregelmessig som naturen normalt er, vil det være vanskelig med sikkerhet å avgjøre om en har for seg et naturlig sprekemønster hvor alle deformasjonsprosesser, på grunn av vanntrykket, vil stoppe opp av seg selv eller ikke komme i gang, hvis da ikke sjakten legges tilstrekkelig dypt og alle lekkasjer i den er rimelig tett.

Det er naturlig at et kriterium for nødvendig fjelloverdekning må gjøres avhengig av sjaktens fallvinkel. En har gjort seg visse refleksjoner over dette når en med noenlunde sikkerhet kan se bort fra faren for sidevegs deformasjoner og bare betrakte deformasjoner ut mot dalsiden. Det ser i slike tilfeller ut som en må betrakte sjakten som en åpen sleppe med sjaktens fall og med strøk parallelt dalsiden. Forutsetter en at dalsidens fall er avtagende nedover mot dalbunnen, og at det ikke går noen undersleppe som kan forårsake fjellskred eller glidninger når en får øket porevannstrykk, må en se på det overliggende fjell som en sammenhengende plate som ikke forskyves nede i dalbunnen, men bare bules ut oppe i sjakten. Betrakter en ut fra dette et punkt i sjakten og krever at den vertikale fjellsøyles spenningskomponent vinkelrett på sjakten skal være større enn vanntrykket, må  $\gamma_h \cdot f(\alpha, \nu)$  være større enn  $\gamma_w \cdot H$ . Her er  $\alpha$  lik sjaktens fallvinkel,  $\nu$  er Poissons tall,  $h$  = vertikal overlagringshøyde,  $H$  = vanntrykkhøyde i sjakten regnet etter øvre regulerte vannstand i inntaksmagasinet,  $\gamma_w$  = vannets spesifikke vekt og  $\gamma$  = fjellets spesifikke vekt. Trykkstigningen ved avslag regner en ikke med, idet den er meget kortvarig.

Erfaringene hittil har som nevnt vist at  $f(\alpha, \nu)$  som skal uttrykke Poissons effekt har kunnet settes lik  $\cos.\alpha$  for vinkler opp til  $45^\circ$ . Egentlig burde en ha nyttet en elliptisk funksjon og  $\cos.\alpha$  er ved  $\nu = 0.35$  tilnærmet lik den komplekse funksjon for en elliptisk fordeling av overlagringslasten som er uttrykt ved

$$\sqrt{\frac{\left(\frac{\nu}{1-\nu}\right)^2}{\sin.^2\alpha + \left(\frac{\nu}{1-\nu}\right)^2 \cos.^2\alpha}}$$

Ved  $60^\circ$  fall på sjakten viser denne formel at det enkle uttrykk  $\cos.\alpha$  fortsatt kan nyttes selv om det teoretisk skulle gi noe øket sikkerhet. Ved over  $60^\circ$  fall på sjakten blir uttrykket  $\cos.\alpha$  uegnet. Ifølge tommeregelen skulle i granittisk materiale  $\frac{h}{H}$  for en  $60^\circ$  sjakt være større enn 0.8 frem til det punkt hvor vannet tas i rør frem til stasjonen. Dette krav må betraktes for å være noe høyt i henhold til

disse overlegninger. Men en må tilføye at en bare vet at tommeregelen har vært gyldig for visse massive krystalline bergarter i forholdsvis høye dalsider ved normale tektoniske og topografisk betingede spenninger.

Erfaringene skulle ut fra dette tilsi at en i de fjelltyper og dalsider en har hatt sjakter i hittil i Norge, tilsynelatende har hatt et Poissons tall på  $\nu = 0.35$ . Men dette er en betraktning under den forutsetning at  $\gamma h$  er den eneste spenningsfrembringende last. Det er klart at spenningssituasjonen i dalsiden ikke er slik som tommeregelen forutsetter. Poissons tall varierer og har sikkert en langt lavere nominell verdi, og spenningene i dalsiden er bestemt av den samlede topografiske og tektoniske situasjon ved siden av overlagringslasten og leirsleppefordelingen.

Analysen av spenningene i en dalside ved endelig elementmetoden har gitt noe mer klarhet over forholdene. Ut fra erfaringene her i landet vet vi at største hovedspenning står med mindre fall mot dalen enn dalsiden. Dette tyder på, ifølge spenningsanalysene, at en har tektoniske horisontalspenninger i jordskorpen. Dette er for øvrig en konklusjon som professor Hast også er kommet til ved sine spenningsmålinger. Målinger av Poissons tall på norske bergarter av aktuelle typer viser at dette ligger mellom 0.3 og 0.1, vanligvis mellom 0.2 og 0.16, ved lave enaksede trykkpåkjenninger. Det øker ved høyere trykk. Vi har også fra en lang serie anlegg i dalsider ganske gode holdepunkter for største hovedspennings retning i forhold til det betraktete punkts beliggenhet i dalsiden. En modell ved endelig elementmetoden, som er noenlunde holdbar for fjellsider uten leirsoner, kan derfor fremstilles ved at modellen bringes i overensstemmelse med alle våre erfaringsdata. Nytt er i modellen  $\nu = 0.2$ , en dalsideskråning på  $30^\circ$  og en daldybde på 1000 m uten å gi noen ekstra horisontalspenning utover den som dannes ved overliggende last, får en i de aktuelle nivåer en største hovedspenning parallelt dalsiden og en spenning vinkelrett  $45^\circ$ -sjakten i sjaktplanet som bare ligger på ca. 85 % av den verdi  $\gamma h \cdot \cos.\alpha$  tilsier, og ved en  $60^\circ$ -sjakt over 125 %, fig. 12. Ved innføring av en ekstra horisontalspenning jevnt økende fra 0 i overflaten til  $250 \text{ kg/cm}^2$  i dalbunn-nivået i tillegg til den horisontalspenning som skyldes overlagringslasten, får vi en sterk økning i spenningene vinkelrett sjakten i sjaktplanet. Den stiger f. eks. til over 180 % av  $\gamma h \cdot \cos.\alpha$  ved  $45^\circ$ . Denne ekstra horisontalspenning er langt større enn den tektoniske horisontalspenning man vanligvis har i Norge. Fører en inn en mer sannsynlig ekstra tektonisk horisontalspenning av størrelsesorden  $30 - 80 \text{ kg/cm}^2$  ved dalbunn-nivået, det vil si en total horisontalspenning på  $100 - 150 \text{ kg/cm}^2$ , får vi meget nær overensstemmelse mellom  $\gamma h \cdot \cos.\alpha$  etter erfaringene og de sannsynlige reelle spenninger vinkelrett sjakten i sjaktplanet for en  $45^\circ$  sjakt.

For en  $60^\circ$  sjakt skulle dette tyde på at sjakten skulle tåle vesentlig høyere vanntrykk enn tommeregelen tilsier, vel å merke når dalsiden sprekkemessig er gunstig og

Poissons tall er rimelig høyt. Sikkerheten er etter disse betraktninger ventelig lavest når dalsiden bare er litt slakere enn sjaktens fall, fig. 12. Sikkerheten synes å øke sterkt ved steile sjakter. Den er også vesentlig ugunstigere enn tommeregelen tilsier ved små fallvinkler hos sjakter i høye dalsider, og spesielt under dype daler.

Et Poissons tall på 0.2 synes sannsynlig for de aktuelle bergarter ved de aktuelle dyp for sjakter med trykkehøyde hen mot 300 m. Eksempler på lavere verdier for Poissons tall må en dessverre regne med ikke er uvanlig. Likeledes må en vente at det finnes fjell som på grunn av leirsoner og sterk oppsprekning ikke får bygget opp den typiske spenningstilstanden i dalsiden slik som vi har det i det vi kan betegne massivt fjell. Videre kan også dalsiden mangle bakenforliggende høye fjell og være av høyde ikke vesentlig over den øvre regulerte vannstand i inntaksmagasinet. På den annen side må en regne med at spenningene ofte kan være større enn  $\gamma h \cdot \cos.\alpha$  tilsier, spesielt i høye dalsider, ved høye verdier av Poissons tall og der en har høye tektoniske spenninger. Disse betraktninger og erfaringene våre hittil synes å tilsa at vi tydeligvis ikke har lagt sjakter etter minimumsoverdekning i henhold til tommeregelen på steder med spesielt ugunstig fjell eller topografi før nå ved Byrte hvor heller ikke regelens forutsetninger ble nyttet.

Det er naturlig å beskytte seg mot spesielt ugunstige tilfeller ut fra geologiske og topografiske indikasjoner og ved måling av Poissons tall. Idag å legge endelig elementmetoden til grunn for plasseringer av uforede trykksjakter kan være meget betenkelig på grunn av vanskelighetene med å få en nøyere bestemmelse av de forskjellige nødvendige faktorer som en lokalt har på stedet. Men metoden kan gi en viss støtte i vurderingene. I praksis synes en derfor i dag henvist til en tommeregel for overlagringen som bygger på erfaringer med tilleggsvurderinger basert på fjellets egenskaper, topografi etc.

Vurderingene ved endelig elementmetoden har med andre ord ført til en del betenkeligheter med tommeregelen, spesielt ved meget ugunstig oppsprukket fjell, lave dalsider og spenningsavskjærende, leirførende soner eller der en må anta at bare små topografisk betingede spenninger kommer inn i bildet i de ytre lag i dalsiden og hvor en samtidig ikke har et spesielt høyt Poissons tall. En kan i slike helt utpregede tilfeller risikere å måtte kreve en sikkerhetsfaktor opp til 1.3 ved plassering av sjakten etter tommeregelen, i det minste for sjaktens øvre deler. Ved så sterkt oppsprukket fjell som det her er tale om, vil en ventelig betrakte fjellet som uegnet rent geologisk for en uforet sjakt. Det er heller ved spenningsavskjærende leirsoner og ved meget lave dalsider og ved lave Poissons tall at en bør vise spesiell oppmerksomhet overfor overdekningen i de øvre deler av sjakten.

En viss frykt for de topografisk betingede spenningers ugunstige innflytelse på

spenningsbildet inne ved sjakten har tidligere ført til at en spesielt i høye dalsider har ønsket å legge sjakten noe lengere inn enn tommeregelen tilsier. Dette synes ikke nødvendig med mindre en virkelig har strekkspenninger ute i dalsiden og som følge av dette strekkbruddsprekker. Men har en slike strekkbruddsprekker, bør en se bort fra dette fjellparti ved anvendelsen av tommeregelen. Det er også naturlig å ta hensyn til dagfjellsituasjonen. Sjakten må ligge sikkert under dagfjellet. Dette kommer sterkest inn i bildet der vanntrykket i sjakten er under 100 m. De angitte tommeregler vil derfor naturlig ikke passe for meget korte sjakter. Det er et minstedyp en sjakt bør legges i, avhengig av dagfjellets mektighet, ujevnheter i dalsiden, tilstedeværelse av dalsidesprekker o. l.

Nå må en kunne legge en rettlinjert sjakt innenfor den  $45^{\circ}$  sjakt en har plassert, bare topp-punktet for sjakten forblir det samme som for  $45^{\circ}$ -sjakten. En stiller da et forholdsvis strengt krav til sidedekningen ut i dagen på lavere nivå. Men foreløpig har vi såvidt vites ingen spesielle erfaringer å bygge på som kan angi grensebetingelsene for sidedekningen ved steile sjakter.

På Byrte plasserte man som tidligere nevnt sjakten med en vertikal fjelloverlagringslast på  $1.5 \times$  vanntrykket. Det vil si  $\frac{h}{H} = 0.64$ . Fjellets romvekt er da satt til  $\gamma = 2.65$ . En hadde riktignok høye bakenforliggende fjell, 850 m høydeforskjell sett fra stasjonen, men dalsiden var tydeligvis sterkt gjennomslått av ugunstige sprekker som reduserte innvirkningen av de bakenforliggende fjellmasser. Nede ved stasjonen var imidlertid fjellet meget massivt og tillitvekkende. Minstekravet til fjelloverdekning i henhold til tommeregelen skulle i dette tilfelle ha vært  $\frac{h}{H} = 0.75$ .

Av hendelsesforløpet frem til slutten av august kan man regne ut at et overlageringsforhold på 0.7 var tilstrekkelig ved en trykkehøyde på 280 m. Bruddet skjedde da trykket økte 20 m og overlageringsforholdet ble redusert til 0.64. En nøyere analyse av de opptredende slepper og knusningssoner i sjakten ble utført etter bruddet. Det går klart frem av disse at svært mange slepper og knusningssoner hadde meget ugunstig strøk og fall, men kanskje ikke de mest ugunstige som kan tenkes å forekomme.

En hadde slepper med strøk  $N30^{\circ} - 50^{\circ}V$  som sto tilnærmet parallelt dalsiden og hadde  $60^{\circ} - 70^{\circ}$  fall ut mot dalbunnen. Disse opptrådte enkeltvis som plane, gjennomgående slepper, vanligvis mindre enn 1 cm tykke og med sleppebelegg. Enkelte slepper har imidlertid opp til 20 cm mektighet med oppknust fjell og leire. Sleppematerialet i disse større slepper inneholdt 15 - 20 % montmorillonitt og spor av karbonat. En slik sleppe var det som bl. a. ga de største lekkasjer ut i dagen, og på flere steder har bruddet i sjakten fulgt disse slepper. Det er også slepper med strøk  $N70^{\circ}V$  til  $N80^{\circ}Ø$  som står tilnærmet loddrett dalsiden og parallelt trykksjakten. Disse slepper er fra 0 - 1 cm tykke. Enkelte av dem har et sleppemateriale som inneholder relativt meget karbonat og spor av montmorillonitt. Trolig har også disse slepper

etter utvaskingen hatt stor betydning både for vanntransporten og poretrykksoverføringen fra sjakten ut til utenforliggende leirslepper med mere ugunstig orientering.

I nederste del av sjakten gikk bruddet utenom sjakten etter en sone AA', fig. 8. Sonen var injisert, men ikke innstøpt før injisering. En må derfor regne med at resultatet av injiseringen av denne åpne og sterkt utvaskede sprekkene var dårlig. Denne sone som hadde en svært ugunstig orientering nær parallelt dalsiden med strøk N25°V og fall 55°Ø, har fått fullt vanntrykk og gitt rikelig vanntilførsel et godt stykke utover i fjellet og ned under stasjonen hvor overlagringsforholdet var svært ugunstig i forhold til sleppens strøk og fall.

Sjaktens nedre ca. 100 m hadde meget massivt fjell og heller ingen skader. Dette peker igjen på sleppenes vesentlige betydning for det inntrufne brudd. Det kan også tyde på at tverrdeformasjonen har gitt et større bidrag her enn det som tommeregelen skulle tilsi. En ligger her innenfor en sterkt spenningsomlagrende sleppe som også ifølge modellen ved endelig elementmetoden skulle gi ekstra gunstige spenningsforhold.

Under oppfyllingen av sjakten og den senere drift frem til først i september skjedde det som nevnt ingen påviselige skader så lenge vannstanden lå under kote 720 i Botnedalsvannet. Fra begynnelsen av september steg vannstanden raskt til kote 740 (se fig. 5). Det kan tenkes at det forut for denne trykkøkning og selve bruddet i sjakten, skjedde deformasjoner og spenningsomlagringer i det utenfor- og nedenforliggende fjell på grunn av vanntilførsel gjennom sleppe AA', slik at bl. a. spennings situasjonen i foten av fjellet ble noe ugunstigere og bruddet fikk mer omfattende følger. Men bruddrekkefølgen endrer imidlertid ikke totalbildet av årsakssammenhengen til bruddet.

Fig. 9 viser sprekkeroser i dagen og i kraftstasjonen. På bilag nr. 1 er det angitt en mer detaljert oversikt over observasjoner i sjakten og kraftstasjonsområdet etter bruddet. Fig. 10 viser sprekkeroser fra sjakten etter bruddet. Det fremgår av disse at bruddet i de lavere deler av sjakten har gått etter slepper nær parallelt dalsiden. Dette tyder klart på at sjakten har ligget for grunt, slik at det har vært for lave in-situ spenninger vinkelrett sjakten i sjaktplanet. Sjakten har derimot ligget tilstrekkelig dypt til at horisontalspenningene i denne del av sjakten har vært tilstrekkelig store. Øverst i sjakten er derimot bruddet gått nær vinkelrett dalsiden. Dette tyder på at sjakten her har ligget i fjell med for små horisontalspenninger parallelt dalsiden. Ser en på kartbildet, fremgår det at i forhold til en jevn dalside (regnet ca. 70 m til hver side) vil sjakten ved H = 25 m ligge mindre enn 15 m inne i dalsiden, og ved H = 75 m mindre enn 35 m inne i dalsiden. Tar en dertil i betraktning de for dannelsen av horisontalspenninger meget ugunstige og avskjærende slepper for horisontalspenninger parallelt dalsiden med retning N65° -



75°V, er mangelen på horisontalspenninger i dette øvre nivå og den inntrufne bruddform der forståelig.

Et forhold som kan tenkes å ha hatt en viss betydning bl. a. for hastigheten hvormed bruddet foregikk, er det høye grunnvannspeil man tydeligvis har hatt på grunn av den sterke nedbør fra begynnelsen av september måned. Men noen nevneverdig betydning for årsakssammenhengen har dette neppe hatt.

Som et bidrag til å avklare stabilitetsforholdene ved fullt vanntrykk i trykksjakten, ble det ved NTH også utført en mer spesiell analyse av trykksjaktområdet ved hjelp av endelig elementmetoden. Modellen ble i dette tilfelle tegnet så naturtro som mulig. De sprekker som hadde vist deformasjoner etter bruddet ble lagt inn som potensielle bruddflater, men bergtrykket ble nær sagt bare gjort avhengig av den vertikale overlageringslast i sjaktområdet alene. Derimot ble det nytt et Poissons tall på 0.33. Vanntrykket på sleppene ble gitt i henhold til det trykk som sto i sjakten. Resultatet av analysen synes på en måte å bekrefte de inntrufne deformasjoner og bevegelser både i sjakten og i stasjonsområdet, og dermed også hovedårsaken til bruddet. Men det er vanskelig å trekke særlig vidtgående slutninger av dette materiale.

Skal en summere opp erfaringene fra Byrte, må en si at ugunstige sleppekonstellasjoner i fjellet stiller meget strenge krav til overlagerings størrelse. De synes minst å måtte være som tommeregelen tilsier. Det er mulig at en burde gå over til å nytte en større sikkerhet, og forenklet si at ved  $\gamma = 2.65$  må  $\frac{h}{H} > 0.4$  når  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\frac{h}{H} > 0.55$  når  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\frac{h}{H} > 0.65$  når  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\frac{h}{H} > 0.8$  når  $\alpha = 60^\circ$ ,  $\frac{h}{H} > 0.9$  når  $\alpha = 75^\circ$  og  $\frac{h}{H} > 1$  når  $\alpha = 90^\circ$ , og at overlageringer på grunn av brattere dalsider enn  $25^\circ$  innen horisontalavstand H fra sjaktens topp-punkt, ikke kan godskrives vurderingene for de sjakter som er steilere enn  $45^\circ$ . Dertil må en stille strenge krav til tetningen av lekkasjesprekker. Betydningen av å registrere vannlekkasjer under fremdriften av sjakten må også fremheves. Det er bl. a. de primære lekkasjeobservasjoner, de en får når en bryter inn i en sone, som må være utslagsgivende for de tetningsarbeider som bør foretas.

Uhellet på Byrte har sannsynliggjort brukbarheten av den tidligere nevnte tommeregel ( $H \cdot \gamma_w = h \cdot \gamma \cdot \cos.\alpha$ ) for  $60^\circ$  sjakter. Regelen ville ha gitt godt resultat ved Byrte til tross for ugunstig oppsprekning. Den synes med andre ord å kunne nyttes ved sjakter på  $60^\circ$  i fjell som må ansees for egnet for uforede sjakter rent petrografisk, mekanisk og oppsprekningsmessig sett, men en bør feste særlig oppmerksomhet på overdekning og topografi i sjaktens øvre del der sjakten ligger nær dagen, og holde høyere sikkerhet dette sted av hensyn til tilstrekkelige horisontalspenninger.

En må betrakte bruddet som en følge av en for liten fjelloverlagring i forhold til de opptredende slepper og knusningssoner og topografisk betingede spenninger. Slep-

penes skjærfasthet og bergartens strekkfasthet har bare i liten grad kunnet komme stabiliteten til gode. Heller ikke har de topografisk betingede spenninger i dalsiden begunstiget stabiliteten i den grad topografien kanskje kunne tilsi. Dette skyldes de forekommende knusningssoners orientering i dalsiden og dalsidens ujevne form. Det må videre erkjennes at tetningsarbeidet av lekkasjesonene har vært mindre vellykket og øket følgene av bruddet.

For oversiktens skyld skal en her kort sammenfatte de praktiske holdepunkter en nu er kommet frem til for anvendelse av uforede trykksjakter.

Sjakten må plasseres så dypt at en er sikker på at in-situ spenningen vinkelrett sjakten vil være større på et hvert punkt i den planlagte sjakt enn det ventede vanntrykk i sjakten. Dette krav skal også gjelde langsetter alle utettede lekkasjesprekker som skjærer sjakten eller kan få rikelig vanntilførsel fra sjakten. Som en praktisk tommeregel kan en for sjakter opp til  $60^\circ$  si at  $H\gamma_w$  skal være mindre enn  $h \cdot \gamma \cdot \cos.\alpha$ . Dette bør også gjelde når en ser bort fra alle fremstikkende fjellneser og betrakter en avjevnnet dalside i 150 - 200 m bredde. En sikkerhetsfaktor på 1.1 - 1.3 etter forholdene ansees rimelig, men under dype daler bør den være 1.6. Poissons tall bør undersøkes for representative bergarter fra sjaktområdet til orientering.

For å være sikker på at en har tilstrekkelige horisontalspenninger parallelt dalen, må sjakten (som her forutsettes rettlinjet) ligge godt under dagfjellet og minst ha 30 m korteste veg ut til den teoretiske avjevnede dalside ved 20 m vanntrykk, og samtidig minst ha 20 m korteste veg ut til undre grense for dagfjellet ved 20 m vanntrykk. Er dalsiden meget høy, bør sjakten trekkes noe lenger inn ifall det er strekkspenninger og strekkbruddsprekker ytterst mot dalsiden. En bør da se bort fra det ytterste parti nær fjelloverflaten hvor en finner strekkbruddsprekker i fjellet ved benyttelse av tommeregelen. Der avspennende leirsoner skjærer av deler av dalsiden, og der dalsiden er av samme høyde som sjakten og uten særlig høyere bakenforliggende fjell, bør en også vise større forsiktighet ved å øke sikkerhetsfaktoren, spesielt for sjakters øvre del, avhengig av situasjonen.

Skal en nytte en steilere rettlinjet sjakt enn  $60^\circ$  fall, må en først plassere en sjakt på  $45^\circ$  etter reglene for denne og så legge den brattere sjakt i sin helhet innenfor traséen for  $45^\circ$ -sjakten.

At sjaktens plassering har vært riktig, kan til en viss grad kontrolleres ved bergtrykksmålinger ved foten av sjakten før den sprenges.

Bergarten som fjellet består av må ha et rimelig høyt Poissons tall ( $>0.18$  laboratoriemålt) og en meget lav porøsitet og ikke kunne løses opp av surt vann. Karstfenomener må ikke forekomme. Fjellet må kunne karakteriseres som krystallint og mas-sivt. Sjakten må plasseres utenom større leirsoner og ikke i sprødt oppsprukket

fjell innenfor meget tette skifere eller leirsoner som har middels til steilt fall ut mot dalen og et strøk nær parallelt denne. Dette ifall en ikke i tommeregelen nytter en høy sikkerhetsfaktor avpasset etter forholdene. Spesielt må man være oppmerksom på faren for fjellskred og unngå steder der leirsoner med midlere til steilere fall mot dalen skjærer ut i dalsiden og har et strøk med liten vinkel til dalsiden.

Alle lekkasjer inne i sjakten skal tettes slik at lekkasjene ut, når vanntrykket kommer på, bare i uvesentlig grad øker poretrykket utover det som var til stede før sjakten ble sprengt. Dette betyr at en tetning må foretas ved utstøpning med injisering og eventuelt andre tiltak, slik at en oppnår en meget betydelig reduksjon av lekkasjene, spesielt ved høye vanntrykk og overdekninger nær de angitte minstekrav. På grunn av vårt sure vann, må spesiell oppmerksomhet vises alle kalkspatslepper som kan gi potensielle store lekkasjer.

For å kunne få den nødvendige oversikt over de problemer fjellet byr på, må det foruten en generell geologisk kartlegging foretas en nøye kartlegging og bestemmelse av knusningssoner. Dertil må detaljoppsprekningen og Poissons tall studeres og en nærmere vurdering av dagfjell- og bergtrykksituasjonen foretas. En nøye profilering av dalsiden over sjakten og et par hundre meter til sidene for denne må også gjennomføres. En ingeniørgeolog bør under alle omstendigheter delta i prosjekteringen av uforede sjakter, og det er av stor betydning at dette samarbeide innledes på et tidlig stadium under prosjekteringen.

### Reparasjonsarbeidene.

Det ble fort klart at sjakten bare kunne gjøres driftsklar igjen enten ved full utstøpning over lange partier eller ved pansring. Det var videre høyst tvilsomt om fjellet alle steder hadde tilstrekkelig evne lenger til å oppta vanntrykk.

Resultatet av vurderingene ble at man valgte å pansre hele sjakten. Pansringen ble bestilt hos Kværner Brug A/S.

De andre løsningene som ble overveiet innebar alle et visst risikomoment - ikke bare teknisk men også kostnadsmessig. Tidsmomentet var meget vesentlig i dette tilfelle, og man var derfor tiltalt av en mest mulig konvensjonell løsning.

Det var alt et godt stykke ut i oktober da bestemmelsen om pansring ble tatt. Det måtte satses på å ha etablert adkomst opp lia til tunnelnivå og gjort påhugg for et tverrslag inn til toppen av sjakten innen vinteren.

Fjellsiden utenfor trykksjakta er ganske bratt, og der var på forhånd ingen adkomst til toppen av sjakta inn til nivå med tilløpstunnelen. Vegforbindelse kunne ikke komme på tale på grunn av terrengvansker, og anlegget hadde derfor valget mellom

taubane eller trallebane.

Trallebanen ble valgt ut fra en samlet vurdering av økonomi, sikkerhet ved transport av utstyr og personbefordring, lastekapasitet, byggetid, bruk av egne arbeidere, og materiell man allerede hadde på Tokke. Vi kan i dag si at valget av trallebanen var det riktige.

Man startet med å bygge en ca. 200 m lang veistump - stigning 1 : 9 - nede ved fylkesveien, fig. 11. Videre bygget man en 400 m lang trallebane for rør- og materialtransport opp til nivå med tilløpstunnelen.

Arbeidet med bygging av trallebanen startet ca. 1. november 1968. Gjennomsnittlig var brukt 18 mann på dagtid, fordi man ville utnytte dagslyset siden terrenget var både iset og glatt. Man var imidlertid begunstiget av rimelige værforhold og arbeidet gikk greit.

Parallelt med byggingen av trallebanen drev man forskjæring for et 72 m langt tverrslag. Alt utstyr for dette ble båret opp lia.

Da man hadde fått gjennomslag på tverrslaget ble en arbeidsgjeng satt til arbeid inne i tilløpstunnelen, mens en annen gjeng gikk i gang med tilriggingsarbeider på toppen av trallebanen. Det var nødvendig med omfattende tilriggingsarbeider for montering av sjaktspill og wirer i tilløpstunnelen. På toppen av sjakten måtte det strosses en god del for montasje av vippebru og rullebatteri. I krysset mellom tverrslag og tilløpstunnel ble det montert svingskive.

Selve sjakten var opprinnelig drevet med Alimak og når luften var klar kunne man se gjennom hele sjakten. For å lette utstikkingen for skinneleggingen ble det nyttet en laserstråle. Laserapparatet ble montert i en egen "skreddersydd" jernkasse på sålen like nedenfor rullebatteriet.

Jernkassa var fastsveiset i bolter og det hele innstøpt mot fjell. Strålen var justerbar i alle retninger og i bunnen av sjakten hadde man en kontrollbolt. Til å legge skinnene brukte man en egen mal utformet som en blink, og den store fordel var at man kunne justere skinnene helt riktig på plass med en gang. Dessuten hadde de som gikk foran og boret boltehullene en fin retning å gå etter. Det må sies at skinnegangen ble særlig jevn og god.

For å legge ut skinnegang i 60° sjakt ovenfra, hadde man ingen tidligere erfaringer å bygge på. Dette førte til at man var noe betenkt hva angikk den sikkerhetsmessige side av saken. Etter diverse planleggingsarbeider ble det bestemt å bygge en innelukket skinneutleggertralle, hvor det opprinnelig var meningen at alt arbeid skulle utføres ifra. Tralla var utvendig kledd med netting og man hadde i alt 3 plattinger som var forbundet med innvendig stige. Den nederste plattingen var utkraget fra selve tralla og det var meningen at sveising av skinnene skulle foregå fra denne.

Alt nødvendig utstyr til bruk for skinnelegging var påmontert tralla. Skinnene var kappet og boret i 5 meters lengde, og dette viste seg å være en passelig skinnelengde å operere med. Skinnene var plassert på undersiden av tralla, på en slik måte at de lettvent kunne sklis ut og på plass. Det viste seg i praksis snart at det å bevege seg i 60° sjakt ikke var stort vanskeligere enn vanlig 45° og alt arbeid ble utført nedenfor skinneutleggertralla. Surstoff-flasker og nødvendig utstyr var imidlertid plassert inne i tralla. Arbeidsgangen var stort sett denne: Nederst i sjakta var plassert en slodd på meier med treplattning og rekkverk. Her sto påmontert 2 stk. luftvinsjer, og wiren gikk fra disse opp i kasteblokk og ned til den samme bukken. På den måten kunne bukken kjøres av folkene som var på den. Som ekstra sikkerhet var montert lange wirestropper som var festet i skinnegangen etter hvert som den ble lagt nedover i sjakta. To mann på den nedre bukken boret opp alle hullene, satte i bolter og skrudde fast underlagsvinkeljernene. Til å legge ut skinnene hjalp alle mann til og skinnene ble sveiset fast ovenfra og nedover. Sveiseren beveget seg fritt i sjakta, men hadde noen 2 x 4" bord å stå på, som var lagt på bukkene for skinnegangen.

Man må si at arbeidet gikk greit unna og man klarte gjennomsnittlig 7.6 m skinnegang pr. skift. Man må her huske på at fjellet i sjakta var sprukket opp langsetter slik at en del tid gikk med til fjellrensk, litt bolteboring osv.

I midten av april startet monteringen og innstøpingen av pansringen, et i alle deler konvensjonelt arbeid som ikke skal beskrives nærmere her.

Som en ekstra sikring ble et kort stykke av tilløpstunnelen foran konusen og den nedste del av svingesjakten støpt ut. To slepper i tilløpstunnelen ble plombert. Tverrslagsproppen ble støpt 27. august.

I selve kraftstasjonen var de bygningsmessige reparasjonsarbeidene av relativt beskjedent omfang. Enkelte småskader på sprøytebetongen i maskinsalhvelvet måtte utbedres.

Vannet som oversvømmet stasjonen inneholdt adskillig sleppemateriale og noe olje, slik at rengjøringen av rom og utstyr tok adskillig tid.

Selve turbinen fikk naturlig nok ingen skader, men regulatorutstyret måtte totaloverhales.

Generatoren ble også totaloverhaldt med delvis utskifting av stator- og rotorviklinger. Transformatoren ble rengjort og tørket, men hadde ellers ingen skader. Beskyttelsesutstyret for generator og transformator ble skiftet ut. Omtrent hele kontrollanlegget i stasjonen ble erstattet med nytt materiell. Apparatet ble totaloverhaldt.

Den 5. september ble vannet påsatt i trykksjakten. Været var på denne tid spesielt gunstig fordi det i lengre tid hadde vært meget tørt. Det ble holdt nøye utkikk etter eventuelle vannlekkasjer både inne i stasjonen og ute i dalsiden. Etter knapt ett døgn ble det litt øking i lekkasjen inne i transporttunnelen og trykkrørstunnelen i stasjonen. Økingen var ikke stor, men siden været var så tørt kunne man med bestemthet si at dette sto i forbindelse med vannet i tilløpstunnelen. Det ble besluttet å bygge en måledam og følge nøye med for fremtiden. Det har i løpet av høsten 1969 ikke vist seg tegn til øking, og lekkasjene inne i stasjonen har dessuten nøye sammenheng med nedbøren ute.

Det ser derfor ut til at de sikringstiltak som har vært utført i trykksjakt og tilløpstunnel for Byrte kraftverk har vært tilstrekkelige. Men Byrte kraftstasjon vil for all fremtid være en "våt" stasjon, fordi hele fjellet er sprukket opp og regnvann og snøsmelting kommer direkte ned i stasjonen. Det har vært nødvendig å sette inn øket permanent pumpekapasitet der.

Kraftverket kom i regulær drift 11. september 1969.

Reparasjonsarbeidene etter bruddet fordyrer Byrte kraftverk med 5.25 mill. kroner.

Kostnadene fordeler seg på hovedpostene slik:

|     |                                                                                                                   |     |                   |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------------------|
| 1)  | Tilrigging, inklusive brakker, telefon og kraft.....                                                              | kr. | 225.000           |
| 2)  | Vei og trallebane, inklusive spillmontasje, vedlikehold og bilhold "                                              |     | 360.000           |
| 3)  | Tverrslag, inklusive skinnegang og spill.....                                                                     | "   | 285.000           |
| 4)  | Skinnegang i sjakt, inklusive diverse sjaktarbeider.....                                                          | "   | 300.000           |
| 5)  | Innstøping av stålforing, inklusive nedre bend og konus.....                                                      | "   | 520.000           |
| 6)  | Diverse arbeider, herunder stross og støp i tilløpstunnel, snø- og skogrydding, undersøkelser og kartlegging..... | "   | 240.000           |
| 7)  | Stålforing, inklusive transport, montasje og maling.....                                                          | "   | 890.000           |
| 8)  | Reparasjon av bygningskonstruksjoner.....                                                                         | "   | 270.000           |
| 9)  | Reparasjon av kraftstasjonsutstyr.....                                                                            | "   | 800.000           |
|     |                                                                                                                   |     | Kr. 3.890.000     |
| 10) | Rentebelastning.....                                                                                              | "   | 1.360.000         |
|     |                                                                                                                   |     | Sum kr. 5.250.000 |

Oslo, den 31. januar 1970.

K. Y. Nilsen

Oversikt over observasjoner i sjakten og kraftstasjonsområdet etter bruddet.

| Pel nr. | Strøk | Fall      | Sprekke-avstand (cm) | Merknader.                                                                                                                                                |
|---------|-------|-----------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 15      | N85°V | 60°S      | 10 - 50              | 100 - 200 cm bred sone med glatte sprekker. Enkelte av sprekkene har et 0.5 - 1 mm tykt karbonatbelegg. Litt fuktighet i hengen.                          |
| 20      | N85°V | 60°S      |                      | Sprekkesonen skjærer ut i søndre vegg. Sonen har her en bredde på 50 cm. Noe fuktighet.                                                                   |
| 25      | N75°V | 60°S      | 50 - 100             | Glatte sprekker.                                                                                                                                          |
| 30      |       |           |                      | Massivt fjell i hele sjakttverrsnittet.                                                                                                                   |
| 40      |       |           |                      | Massivt fjell i hele sjakttverrsnittet.                                                                                                                   |
| 50      |       |           |                      | Massivt fjell i hele sjakttverrsnittet.                                                                                                                   |
| 55      | N85°V | 70°S      |                      | Et par sprekker med tynt sleppebelegg, ellers massivt.                                                                                                    |
| 60      |       |           |                      | Massivt fjell.                                                                                                                                            |
| 70      |       |           |                      | Massivt fjell.                                                                                                                                            |
| 80      | N10°V | 55 - 60°Ø |                      | Et par riss nær sålen.                                                                                                                                    |
| 90      | N15°V | 50°Ø      |                      | 2 - 3 mm bred åpen sprekk kommer ut i hengen.                                                                                                             |
| 95      | N25°V | 50°Ø      |                      | To 1 - 2 mm brede åpne sprekker, den ene nær hengen, den andre noe over sålen. Ellers massivt fjell.                                                      |
| 100     | N25°V | 50°Ø      |                      | 1 - 2 mm bred åpen sprekk ved sålen.                                                                                                                      |
| 110     | N25°V | 50 - 60°Ø |                      | 2 - 3 mm bred åpen, ru sprekk. Noe uregelmessig forløp, virker som friskt bruddplan. I søndre vegg ligger sprekken nær hengen, i nordre vegg nær sålen.   |
| 110     | N75°V | 50°S      | 100 - 200            | Glatte riss.                                                                                                                                              |
| 120     |       |           |                      | Samme som ved pel 110.                                                                                                                                    |
| 130     | N20°V | 55°Ø      |                      | 2 - 3 mm bred, åpen, glatt sprekk ved hengen. Ellers massivt fjell.                                                                                       |
| 140     | N35°V | 50°Ø      |                      | I søndre vegg følger bruddet en 2 - 3 mm bred glatt sprekk nær hengen. I nordre vegg går bruddet langs en 2 - 3 mm bred, ru, frisk sprekk noe over sålen. |
| 140     | N65°V | 55°S      | 30 - 50              | Glatte, gjennomgående sprekker.                                                                                                                           |
| 150     | N80°Ø | 55°S      | 20 - 50              | Markerte, glatte sprekker. Bruddet bare synlig som enkelte riss nær sålen i nordre vegg.                                                                  |

| Pel nr. | Strøk      | Fall      | Sprekke-avstand (cm) | Merknader.                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------|------------|-----------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 160     | N65°V      | 80°S      | 50 - 100             | Glatte, gjennomgående sprekker. Bruddet er bare synlig som et par tynne uregelmessig forløpende riss i søndre vegg.                                                                                                                                                                              |
| 170     | N75°V      | 60°S      | 20 - 100             | Rissretning. Bruddet synlig som et par 0.5 - 1 mm brede, ru, friske sprekker midt i veggene.                                                                                                                                                                                                     |
| 180     | N70°V      | 55°N      |                      | Bruddet følger en tynn, ru, uregelmessig sprekk midt i veggene.                                                                                                                                                                                                                                  |
| 180     | N70°V      | 50 - 60°S | 20 - 50              | Rissretning.                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 190     | N35°V      | 58°Ø      |                      | Ca. 1 cm bred, åpen, glatt sprekk, noe over sålen.                                                                                                                                                                                                                                               |
| 200     | N50°V      | 55 - 60°N |                      | Ca. 1 cm bred, åpen, glatt sprekk. Samme sprekk som ved pel 190.                                                                                                                                                                                                                                 |
| 200     | N75 - 85°V | 50 - 60°S | 20 - 50              | Glatte sprekker.                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 210     | N55°V      | 60°N      |                      | 1 - 1.5 cm bred, åpen, glatt sprekk.                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 210     | N50°Ø      | 60°S      |                      | 1.5 m bred sone i hengen med 4 - 5 glatte sprekker med tynt karbonatbelegg. Et par av sprekkene er 2 - 3 mm brede, åpne, med delvis utvasket karbonat. Noe vanndrypp fra sprekkene. Videre oppover i sjakten vrir sprekkesonen seg mot retning N85°V og løper inn i søndre vegg ved ca. pel 220. |
| 220     | N75°V      | 60°N      |                      | 2 cm bred, åpen glatt sprekk med glide-speil.                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 220     | N85°V      | 60 - 70°S | 10 - 100             | Glatte sprekker.                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 220     | N85°V      | 60 - 70°S |                      | En 0.5 - 1 cm bred leirsleppe skjærer inn i søndre vegg. Langs sleppa er det en 2 - 3 mm bred åpen sprekk. Det virker som om sleppa har åpnet seg noe.                                                                                                                                           |
| 230     | N75°V      | 60°N      |                      | 2 cm bred, åpen, glatt sprekk.                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 230     | N85°V      | 60 - 70°S | 10 - 100             | Glatte sprekker.                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 240     | N55°V      | 60°S      | 20 - 100             | Glatte, gjennomgående sprekker med tynt sleppebelegg. Noe vanndrypp fra sprekkene.                                                                                                                                                                                                               |
| 250     | N15°V      | 55 - 60°Ø |                      | Et par 2 - 3 mm brede, åpne sprekker i veggene. Sprekkene er dels glatte og plane, dels ru og med ujevnt forløp.                                                                                                                                                                                 |
| 250     | N65°V      | 60°S      | 10 - 50              | Glatte sprekker. Litt fuktighet og vanndrypp fra sprekkene.                                                                                                                                                                                                                                      |
| 260     | N65°Ø      | 50 - 60°N |                      | 2 - 3 mm bred, åpen, glatt sprekk i søndre vegg. Noe vanndrypp fra sprekkene.                                                                                                                                                                                                                    |
| 260     | N55°V      | 60°S      | 10 - 50              | Glatte sprekker.                                                                                                                                                                                                                                                                                 |



| Pel nr. | Strøk              | Fall              | Sprekke-avstand (cm) | Merknader.                                                               |
|---------|--------------------|-------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 270     | N80 <sup>0</sup> Ø | 60 <sup>0</sup> N | 10 - 50              | 3 mm bred, åpen, glatt sprekk ved sålen.                                 |
| 270     | N55 <sup>0</sup> V | 60 <sup>0</sup> S |                      | Glatte sprekker med tynt sleppebelegg. Noe fuktighet langs sprekkene.    |
| 280     | N35 <sup>0</sup> V | 60 <sup>0</sup> Ø |                      | To - tre 1 mm brede, åpne, ru, ujevnt forløpende sprekker i søndre vegg. |
| 280     | N70 <sup>0</sup> V | 60 <sup>0</sup> S | 20 - 100             | Enkelte stikk.                                                           |
| 290     | N75 <sup>0</sup> V | 60 <sup>0</sup> S |                      | Glatte sprekker.                                                         |

Analyse av sleppemateriale fra trykksjakt.

| Pel nr. | Mont.                     |           | Fri svelling | Sleppe                                                    |
|---------|---------------------------|-----------|--------------|-----------------------------------------------------------|
|         | DTA                       | Fargetest |              |                                                           |
| 145     | Ingen tydelige tegn       | Negativ   | 75 %         | N70 <sup>0</sup> V f. 50 <sup>0</sup> S                   |
| 196     | Kan være noe              | Positiv   | -            | N70 <sup>0</sup> V f. 50 <sup>0</sup> S<br>Lite materiale |
| 209     | Vanskelig å tyde          | Positiv   | 85 %         | N70 <sup>0</sup> V f. 50 <sup>0</sup> S                   |
| 225     | Tyder på innhold av mont. | Positiv   | 90 %         | N75 <sup>0</sup> Ø f. 50 <sup>0</sup> S                   |
| 248     | Usikker, kan være noe     | Negativ   | -            | N75 <sup>0</sup> Ø f. 50 <sup>0</sup> S                   |
| 260     | Usikker, kan være noe     | Positiv   | 65 %         | N75 <sup>0</sup> Ø f. 50 <sup>0</sup> S                   |
| 281     | Kan tyde på spor av mont. | Positiv   | 90 %         | N70 <sup>0</sup> V f. 50 <sup>0</sup> S                   |

Observasjoner i kraftstasjonsområdet.

| Sted                             | Strøk              | Fall                  | Sleppe-tykkelse i cm. | Anmerkninger                                                                 |
|----------------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Luftesjakt (i bunn).....         | N50 <sup>0</sup> V | 35/40 <sup>0</sup> SV | < 0.5                 | Plan, glatt sleppe med klorittbelegg.                                        |
| Lukekammer - A-tunnel.....       | N50 <sup>0</sup> V | 65/70 <sup>0</sup> NØ | 0.5 - 1.0             | Leirsleppe med vannlekasje. Sprekk i betong viser deformasjon på ca. 0.5 cm. |
| Stasjonshall nedstrøms vegg..... | N40 <sup>0</sup> V | 68 <sup>0</sup> NØ    | 0.5 - 1.0             | Leirsleppe med vannlekasje.                                                  |

| Sted                                              | Strøk     | Fall      | Sleppe-<br>tykkelse<br>i cm. | Anmerkninger                                                                                                              |
|---------------------------------------------------|-----------|-----------|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Stasjonshall oppstrøms<br>vegg.....               | N25°V     | 45°NØ     | Ca. 5                        | Glimmerholdig sone.<br>Spor etter glidninger.<br>Vannlekkasjer både før<br>og etter bruddet.                              |
| Transporttunnel til rør-<br>tunnel.....           | Ca. N50°V | Ca. 60°NØ | Ca. 10                       | Glimmerholdig sone med<br>karakter av glidesone.<br>Vannlekkasje, spor et-<br>ter deformasjoner.                          |
|                                                   | N80°Ø     | 54°S      | 0.1 - 0.5                    | Plane slepper.                                                                                                            |
|                                                   | N60°Ø     | 60°S      |                              |                                                                                                                           |
| Rørtunnel ved propp.....                          | Ca. N55°V | 48°NØ     | 0.5 - 1.0                    | Leirslepper med vann-<br>lekkasje, spor etter<br>deformasjoner.                                                           |
| Tverrslag toppen (i på-<br>hugg.....              | N80°Ø     | 60°S      | Ca. 20                       | Sleppesone med noe lei-<br>re.                                                                                            |
| Driftstunnel indre, in-<br>dre kant av nisje..... | N50°V     | 80°NØ     | 3 - 5                        | Leirsone (tatt prøve).                                                                                                    |
| Driftstunnel ca. 10 m<br>innenfor nisje.....      | N50°V     | 70°NØ     | 3 - 5                        | Leirsone.                                                                                                                 |
| Nisje.....                                        | N80°V     | 60°S      | < 1                          | Plane slepper.                                                                                                            |
| Lekkasjested.....                                 | N40°V     | 70°NØ     | < 1                          | Lokal sleppe.                                                                                                             |
| Ca. 300 m nord for sta-<br>sjonen.....            | N - S     | Steilt Ø  | Ca. 5                        | Bruddsone med lekkasje.                                                                                                   |
| Største lekkasjested syd<br>for stasjonen.....    | N30°V     | 70°NØ     | 5 - 10                       | 20 cm sleppesone med<br>5 - 10 cm leire. Tatt<br>prøve. Stort vannut-<br>brudd langs sleppen i<br>ca. 100 - 150 m lengde. |

# TOKKEANLEGGENE

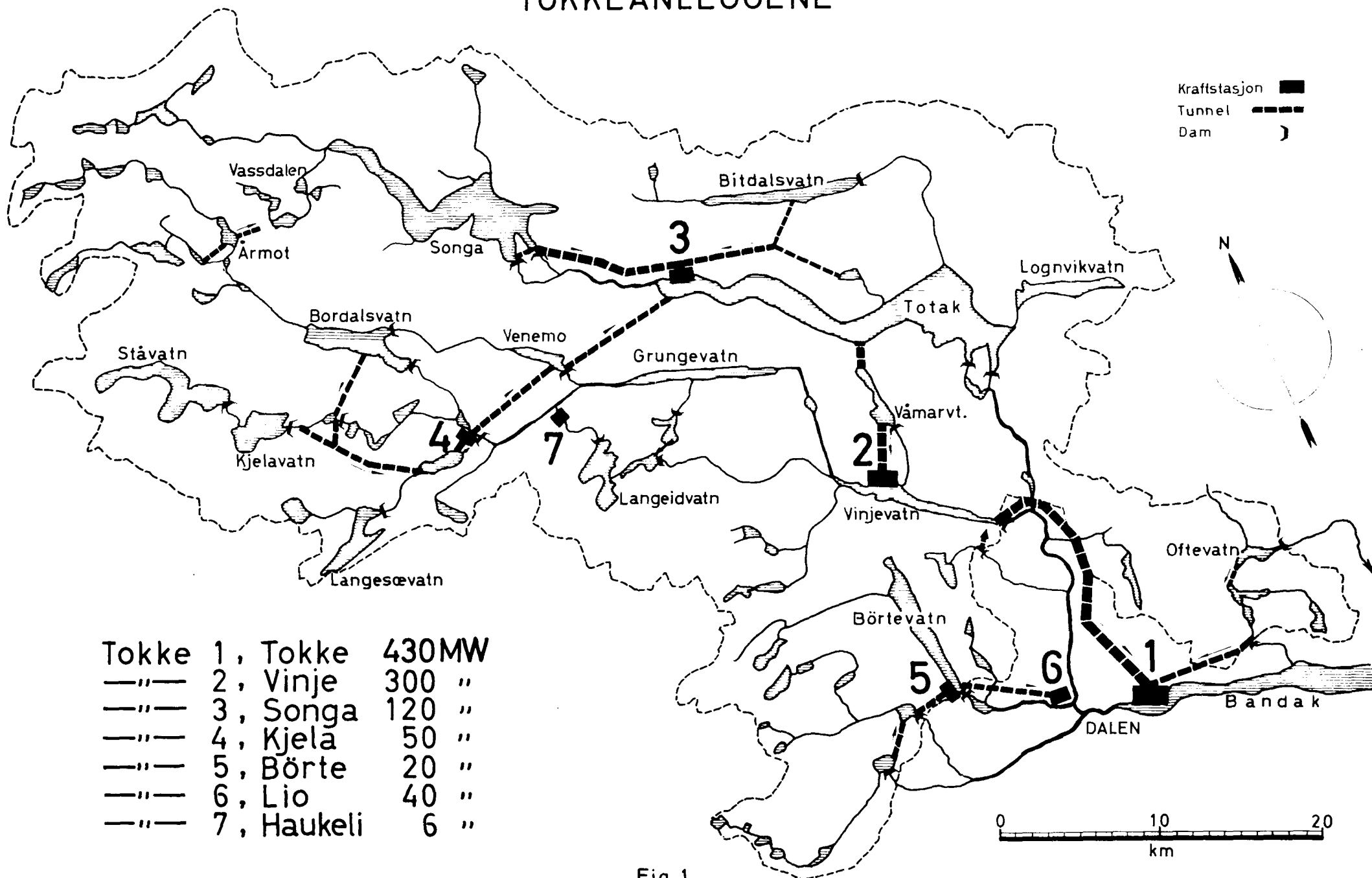


Fig. 1

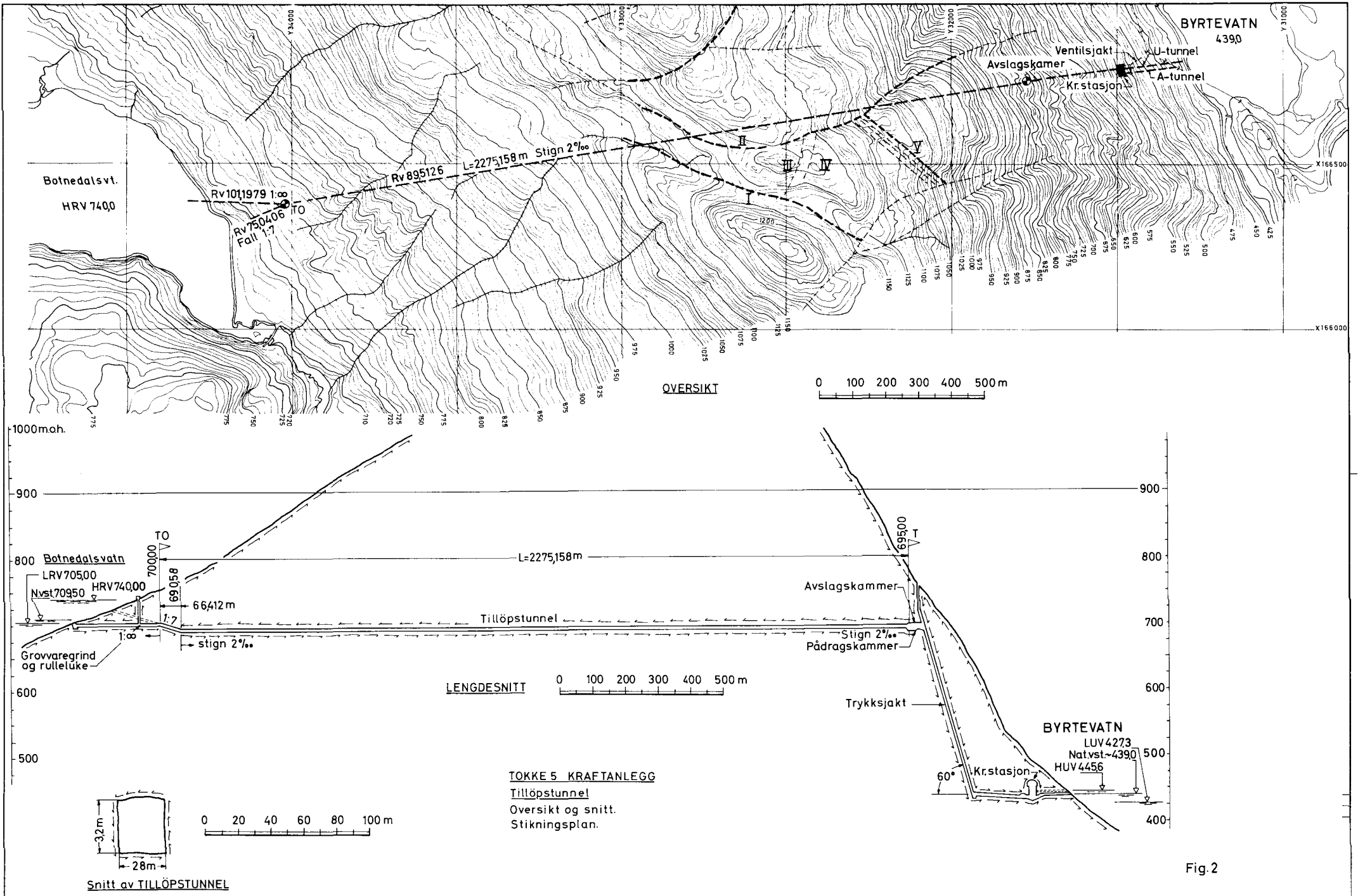


Fig.2

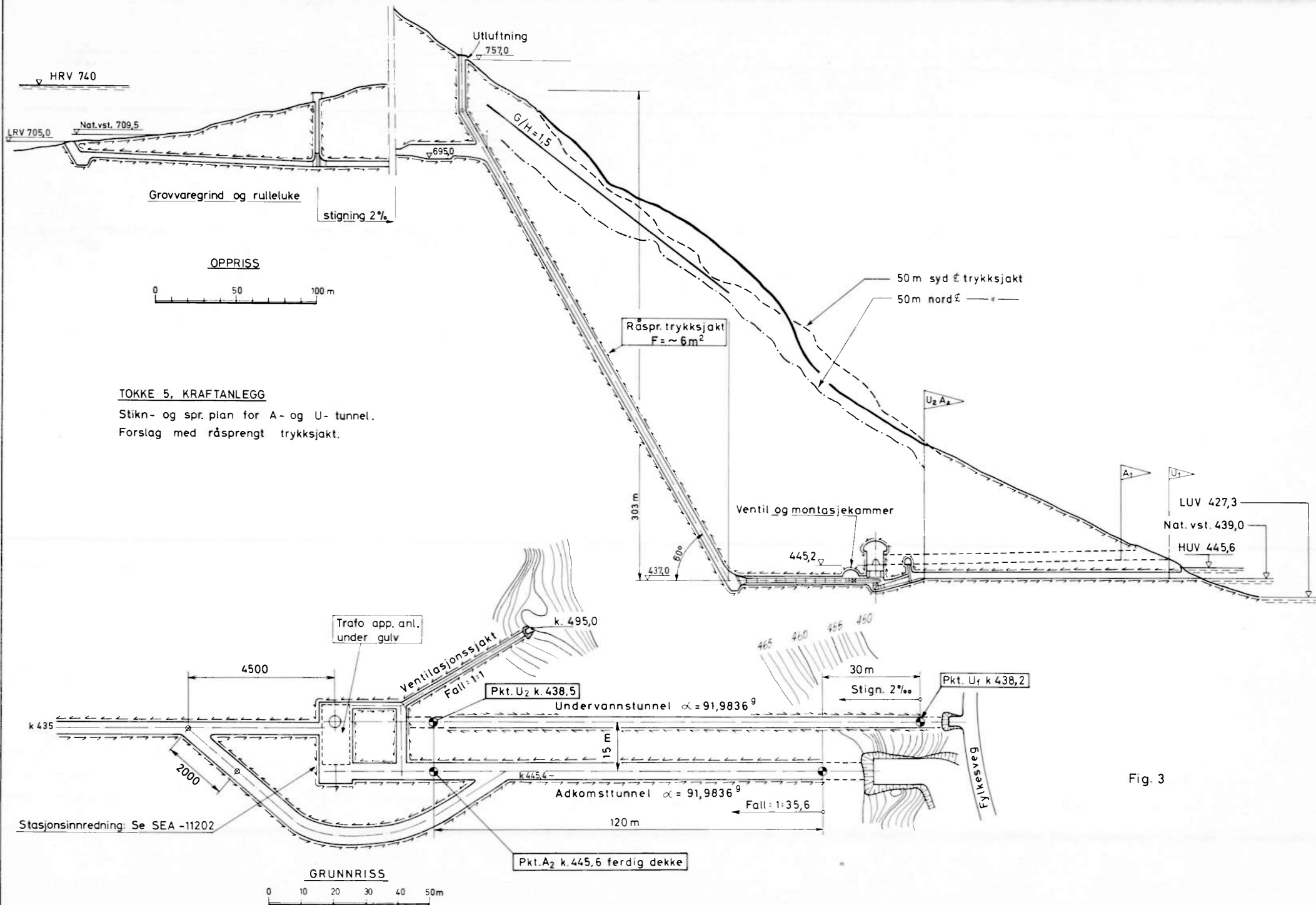


Fig. 3

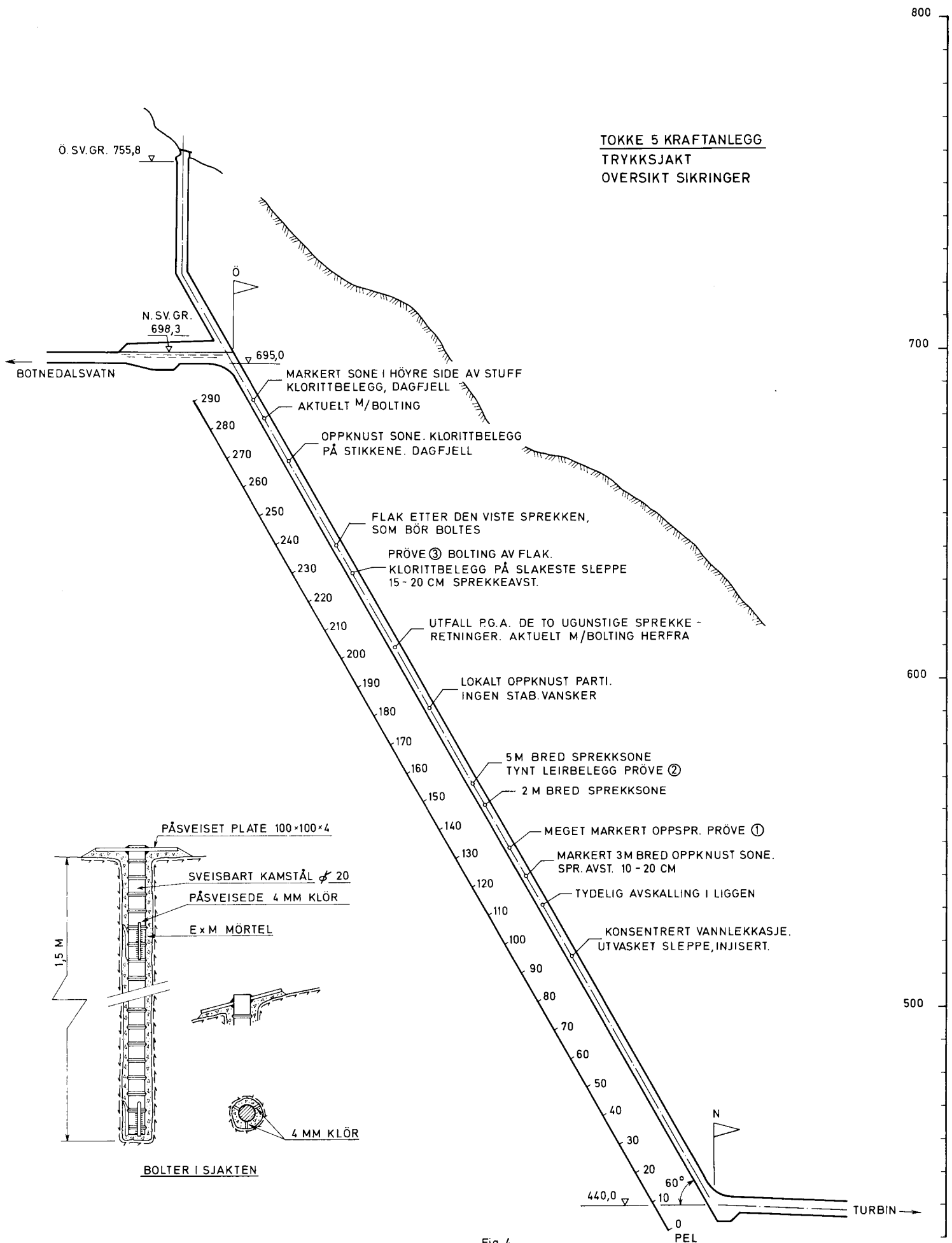
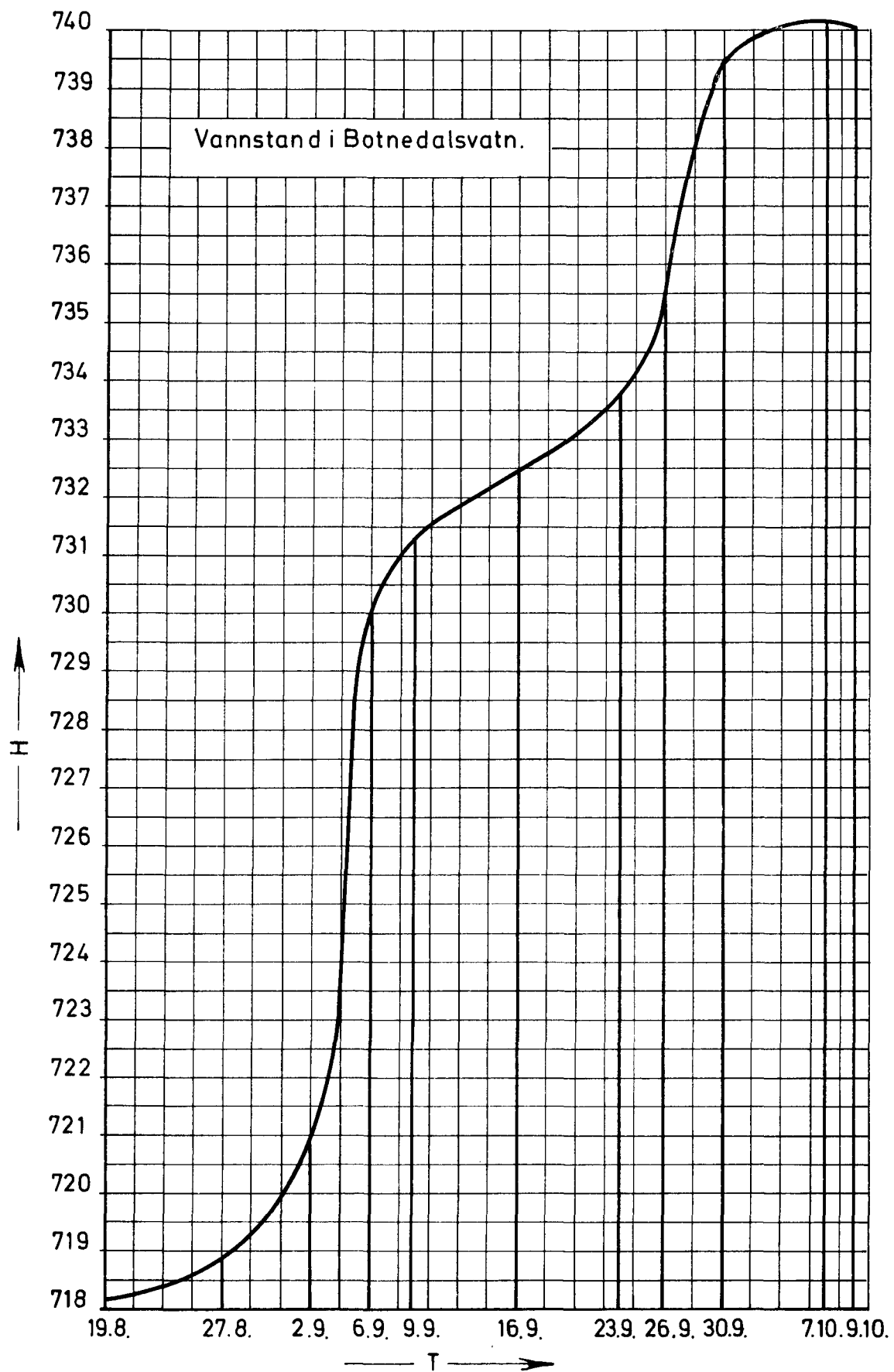


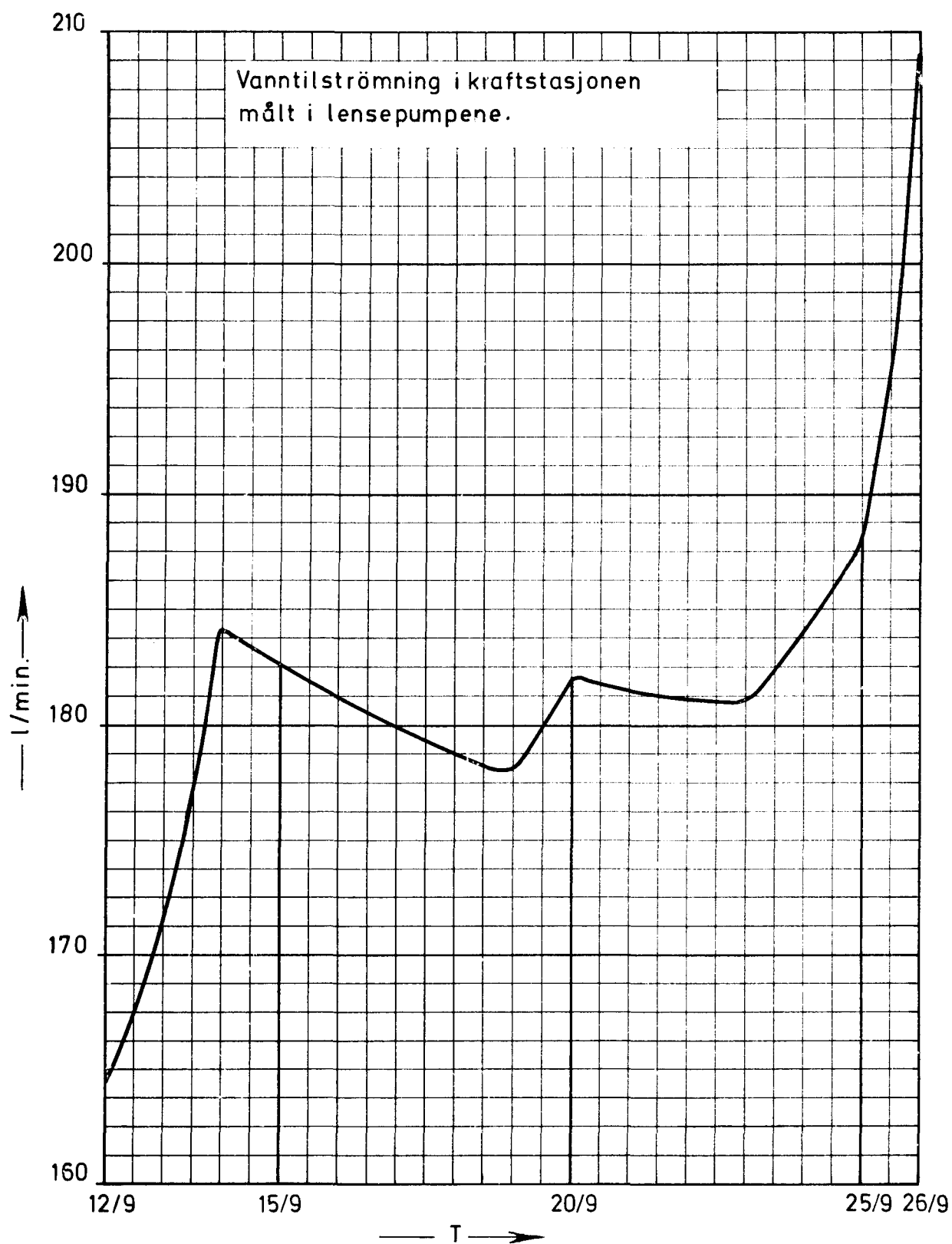
Fig. 4



Overløp (kote 940.0) fra 30.9.

BYRTE KRAFTVERK

Fig.5



BYRTE KRAFTVERK

Fig.6



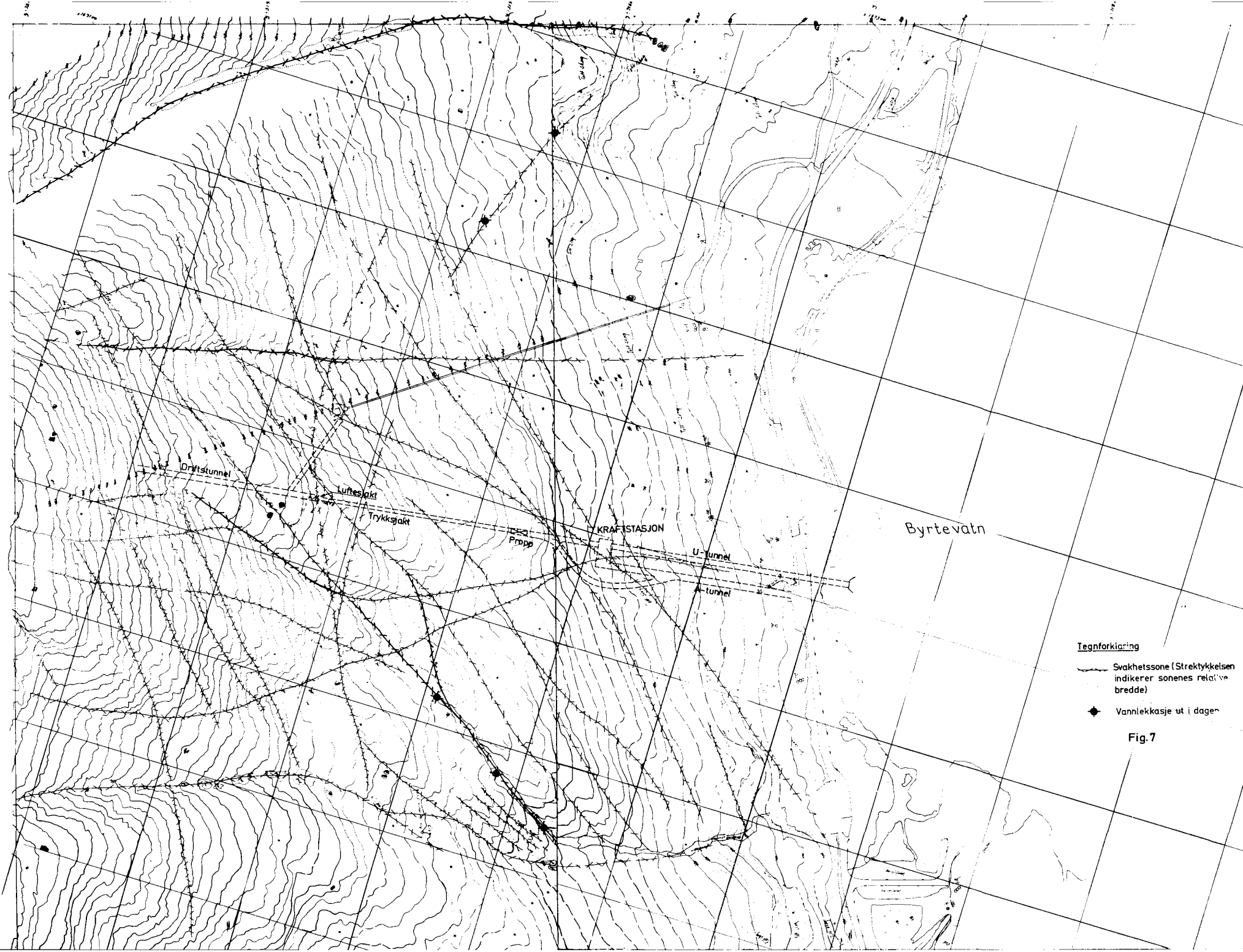
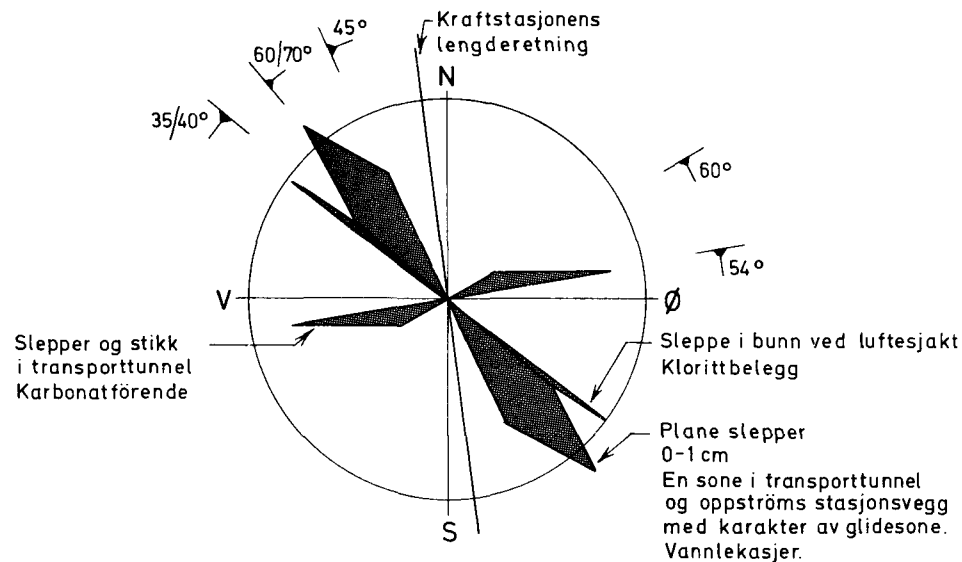
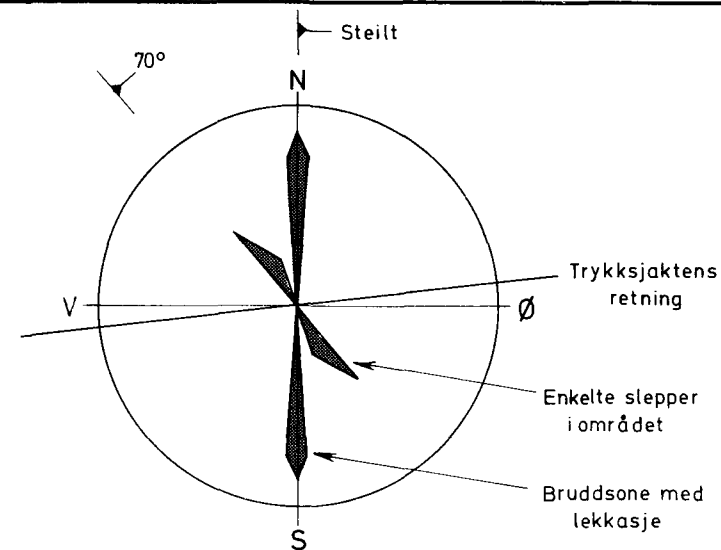


Fig. 7

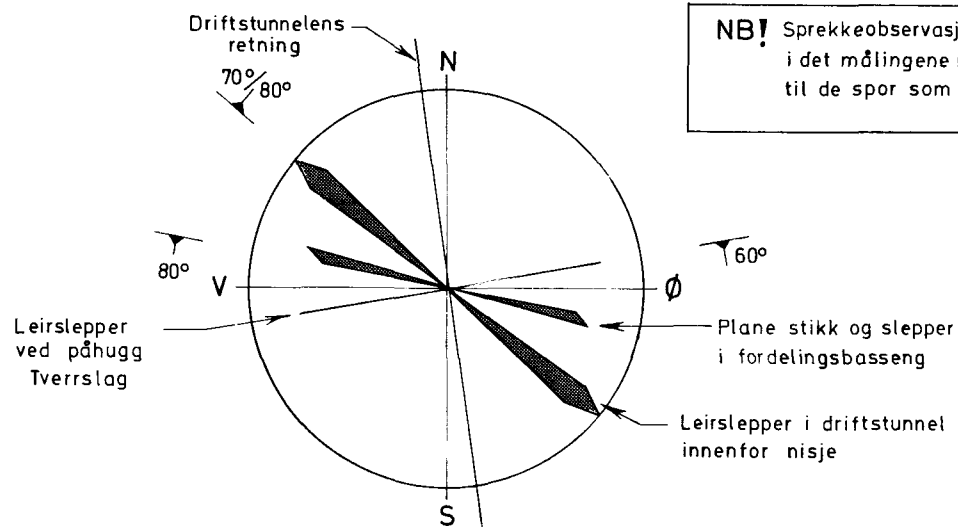




Sprekkrose for kraftstasjon

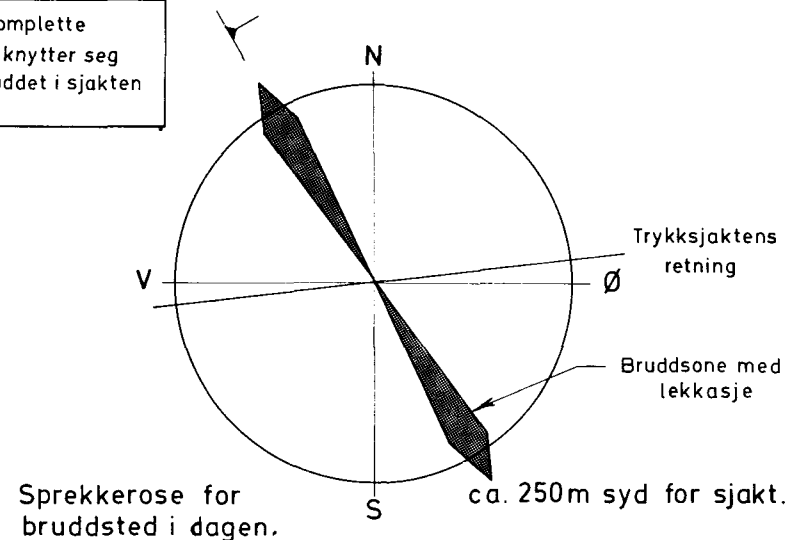


Sprekkrose for bruddsted i dagen  
ca. 250m nord for sjakt



Sprekkerose for fordelingsbasseng

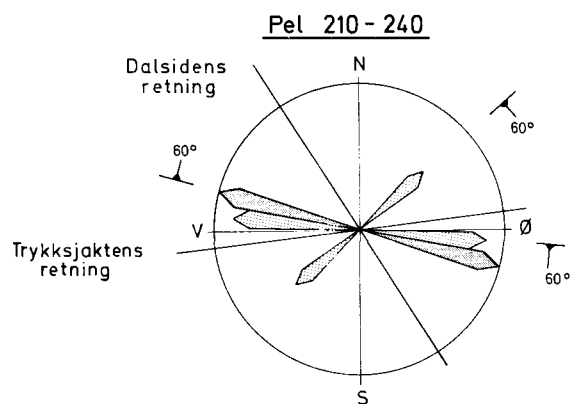
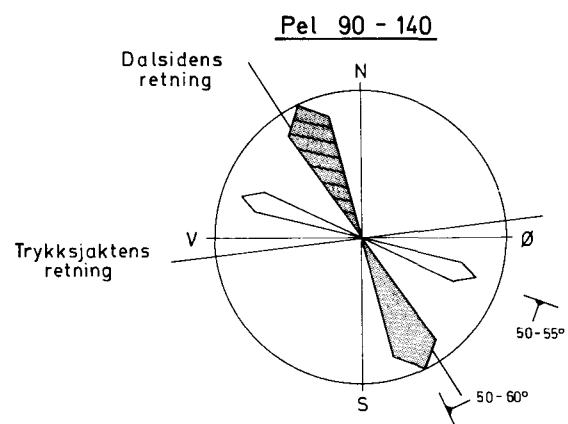
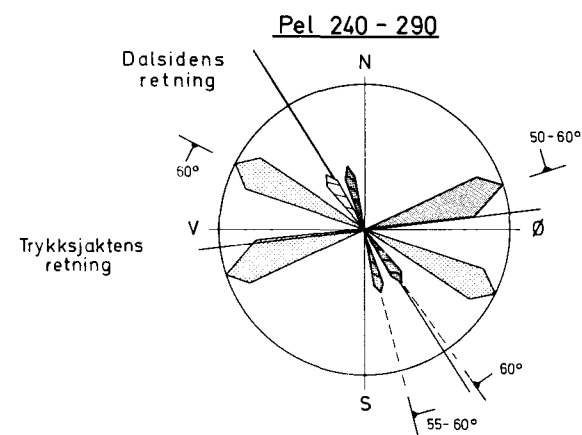
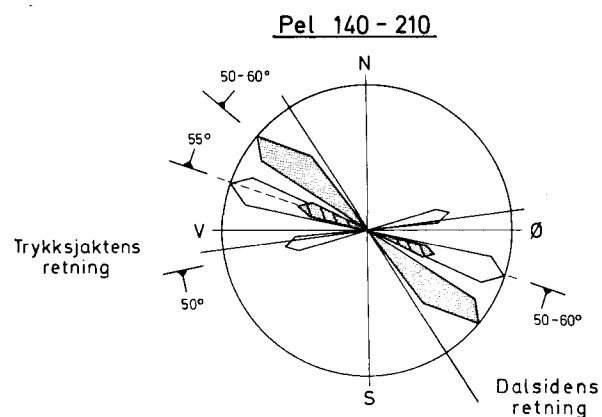
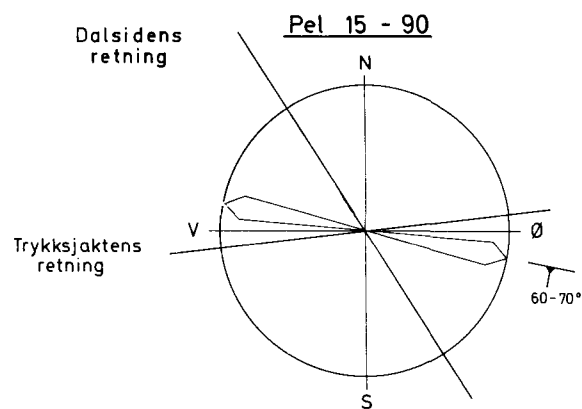
**NB!** Sprekkeobservasjonene er ikke komplette i det målingene i vesentlig grad knytter seg til de spor som finnes etter bruddet i sjakten



Sprekkerose for bruddsted i dagen.  
ca. 250m syd for sjakt.

**TOKKE 5**  
**Sprekkerobservasjoner**  
**i kraftstasjonsområdet**

**Fig. 9**



**TEGNFORKLARING:**

- 50° Strøk- og falltegn for sprekkeretning. Fallvinkel angitt.
- Sprekkeretn. med glatte, plane sprekker.
- Sprekkeretn. med ru, ujevne sprekker.
- Vannlekasje (fuktighet, vanddrypp) inn i sjakten langs det avmerkede sprekkesystem.
- Bruddet langs sjakten følger den avmerkede sprekkeretning.

**TOKKKE 5 - BYRTE KRAFTVERK**  
 Observasjoner i trykksjakten 4.5 - 69  
 Sprekkeroser

**Fig. 10**

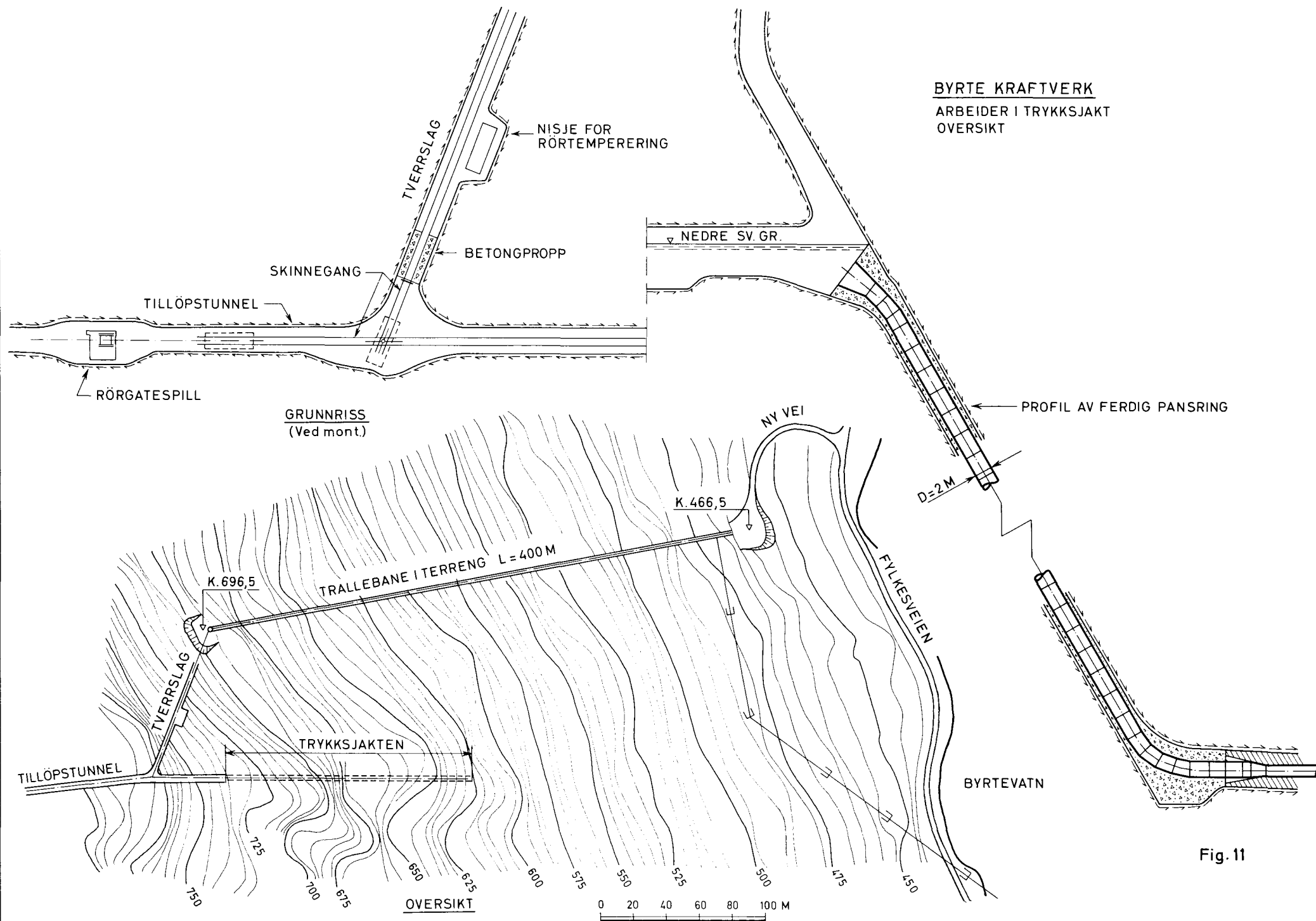


Fig. 11

Fig. 12.

En diskusjon av vertikallastens spenningsbidrag vinkelrett trykksjakten.

---

Figur 12 A: Betrakter en spenningsfordelingen vinkelrett trykksjakten ut fra tommereregelen og sier at denne skal være lik vanntrykket i sjakten ( $H\gamma_w$ ), får vi for "in-situ spenningen" vinkelrett sjakten en sirkel  $a = \gamma h \cdot \cos.\alpha$  ved varierende  $\alpha$ . Regner en med en elliptisk fordeling av overlagringslasten, vil "in-situ spenningen" bli en funksjon av Poissons tall, og vi får en

$$\text{kurveskare } b_v = \gamma h \sqrt{\frac{\left(\frac{v}{1-v}\right)^2}{\sin^2\alpha + \left(\frac{v}{1-v}\right)^2 \cos^2\alpha}}$$

ved varierende  $\alpha$  og  $v = 0.40, 0.33, 0.27, 0.20$  og  $0.10$ .

Kurveskare C er hentet fra spenningssituasjonen vinkelrett sjakten beregnet etter endelig element-metoden ved  $v = 0.20$ , dalsidehøyde = 1000 m og  $30^\circ$  fall på dalsiden for et punkt 150 m over dalbunnen ved  $h = 60$  m i massivt fjell.

C<sub>1</sub>: Uten tektonisk horisontalspenning.

C<sub>2</sub>: Med 250 kg/cm<sup>2</sup> horisontalspenning.

Kurveskare C peker på at en ved massivt fjell burde ha hatt en stor sikkerhet mot brudd parallelt dalsiden ved Byrte, langt større enn ved en serie andre sjakter. Men fjellet var gjennomslått av leirslepper på en meget ugunstig måte, foruten at topografien også var mindre egnet for oppbygging av en ønskelig spenningssituasjon i fjellet.

Spenningene er også angitt som vektorer for  $30^\circ, 45^\circ$  og  $60^\circ$  sjakter.

For en del kjente trykksjakter er forholdet  $\frac{H\gamma_w}{\gamma h \cdot \cos.\alpha}$  beregnet og avsatt i figuren, idet  $\gamma h \cdot \cos.\alpha$  er brukt som enhet, ): sirkelen,  $a$ , vil representere det krav som stilles til overdekning etter tommeregelen. Punkter utenfor sirkelen vil ha for høyt vanntrykk i henhold til regelen, og sikkerheten mot brudd blir større jo lenger inn i sirkelen en kommer.

B: Byrte.

B<sub>1</sub>: Sikkerhet som kreves etter  $\cos.\alpha$ -regelen.

B<sub>2</sub>: Situasjon rett før brudd inntraff.

B<sub>3</sub>: Brudd inntruffet i trykksjakten.

D: Dynjafoss.

H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub> og H<sub>3</sub>: Herlandsfoss (H<sub>3</sub>: Brudd inntraff).

S<sub>1</sub> og S<sub>2</sub>: Svelgen.

T: Tafjord 4.

V: Vik i Sogn (Hove).

Sk: Skar.

Fylte ringer betegner sjakter som har holdt.

Åpne ringer betegner sjakter som har sprukket.

De øvrige sjakter som er kjent av oss synes å ligge godt innenfor sirkelen.

Figur 12 B: Her er overlagringsforholdet  $\frac{h}{H}$  satt som funksjon av sjaktens fall  $\alpha$ .

$$\text{Kurve a} = \frac{h}{H} = \frac{1}{\gamma \cos \alpha} \quad (\gamma = 2.65).$$

Kurve a' er den utvidede tommeregel ved  $\gamma = 2.65$  for sjakter med større fall enn  $45^\circ$ .

Regner en med en elliptisk fordeling av overlagringslasten får vi

$$\text{kurveskare } b_v = \frac{1}{\gamma \sqrt{\frac{(\frac{v}{1-v})^2}{\sin^2 \alpha + (\frac{v}{1-v})^2 \cos^2 \alpha}}}$$

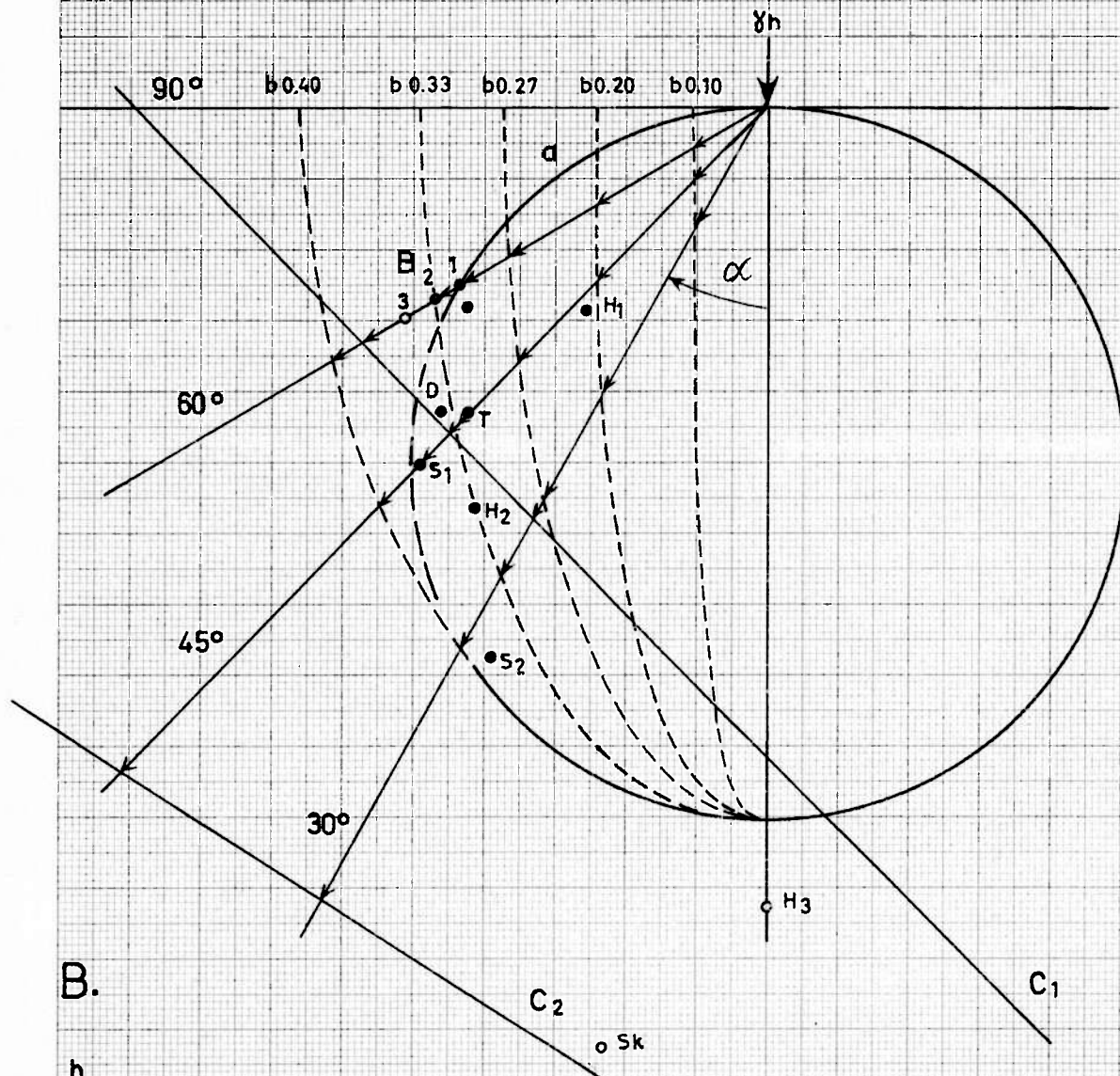
ved  $v = 0.40, 0.33, 0.37$  og  $0.20$ .

For en del trykksjakter er  $\frac{h}{H}$  beregnet og avsatt i figuren. Forholdet er omregnet til  $\gamma = 2.65$  for bergarter med annen spesifikk vekt.

Figuren viser våre erfaringer med tommeregelen som en erfaringsregel. Sjakter som vi vet har rikelig overlagring er ikke tatt med.

# EN DISKUSJON AV VERTIKALLASTENS SPENNINGSBIDRAG VINKELRETT TRYKKSJAKTEN

A.



B.

